

桑椹多酚对广式腊肠贮藏过程中脂质降解和氧化特性的调控作用

候雨雪¹, 林伟玲², 刘学铭¹, 唐道邦¹, 林耀盛¹, 王旭苹¹, 杨怀谷¹, 阮栋³, 程镜蓉^{1*}

(1. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 农业农村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) (2. 中山市黄圃镇农业服务中心, 广东中山 528429)

(3. 广东省农业科学院动物科学研究所, 畜禽育种国家重点实验室, 农业农村部华南动物营养与饲料重点实验室, 广东省畜禽育种与营养重点实验室, 广东广州 510640)

摘要: 脂质氧化和水解是形成腊肠特征风味的重要途径, 但过度氧化会造成腊肠品质的劣变。桑椹多酚是一类天然抗氧化剂, 被证实可以有效缓解腊肠储藏过程中的氧化反应, 然而其通过调控腊肠脂质氧化和水解来改变腊肠风味的相关机制还鲜有研究报道。鉴于此, 该研究将桑椹多酚提取物 (1 g/kg) 加入到肉糜中, 制成广式腊肠, 跟踪 28 d 的储藏过程中腊肠的脂质氧化代谢产物 (共轭二烯、共轭三烯、TBARS 和己醛) 以及脂肪酸 (中性脂肪酸、游离脂肪酸和磷脂) 的组成变化。研究发现, 桑椹多酚主要通过抑制脂质次级代谢产物 (己醛和丙二醛) 来延缓腊肠的脂质氧化。经过 28 d 的储藏期后, 桑椹腊肠中己醛与丙二醛的含量较对照组分别下降 63.10% 与 28.05%。此外, 储藏过程中桑椹多酚还可以有效抑制腊肠储藏过程中游离脂肪酸、磷脂的释放。经过 28 d 的储藏期后, 与对照组相比, 桑椹腊肠的游离脂肪酸含量下降了 9.59%。同时, 桑椹多酚还可以减少风味物质中醛类物质的产生和积累。综上所述, 桑椹多酚主要通过延缓腊肠储藏过程中脂质的降解及次级氧化过程来调控产品的风味。

关键词: 广式腊肠; 桑椹多酚; 脂质氧化; 脂质水解

文章编号: 1673-9078(2023)06-162-170

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.6.0579

The Regulatory Effect of Mulberry Polyphenols on Lipid Degradation and Oxidation Characteristics of Cantonese Sausage during Storage

HOU Yuxue¹, LIN Weiling², LIU Xueming¹, TANG Daobang¹, LIN Yaosheng¹, WANG Xuping¹, YANG Huaigu¹, RUAN Dong³, CHENG Jingrong^{1*}

(1. 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) (2. Agricultural Service Center of Huangpu Town, Zhongshan 528429, China) (3. Institute of Animal Science, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Animal Nutrition and Feed Science in South China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, State Key Laboratory of Livestock and Poultry Breeding, Guangdong Key Laboratory of Animal Breeding and Nutrition, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Lipid oxidation and hydrolysis are important routes to form the characteristic flavor of sausage, but excessive oxidation will cause the deterioration of sausage quality. Mulberry polyphenols are a class of natural antioxidants, which have been proved to be effective in

引文格式:

候雨雪, 林伟玲, 刘学铭, 等. 桑椹多酚对广式腊肠贮藏过程中脂质降解和氧化特性的调控作用[J]. 现代食品科技, 2023, 39(6): 162-170.

HOU Yuxue, LIN Weiling, LIU Xueming, et al. The regulatory effect of mulberry polyphenols on lipid degradation and oxidation characteristics of cantonese sausage during storage [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(6): 162-170.

收稿日期: 2022-05-08

基金项目: 广东省农业科学院食品营养与健康研究中心建设运行经费 (XTXM 202205); 国家自然科学基金项目 (31972074); 清远市科技计划项目 (DZXQY031); 广东省农产品加工技术研发中试公共服务平台产业支撑能力提升与服务体系建设“粤财农[2021]170号”资助项目

作者简介: 候雨雪 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品生物学, E-mail: yxhou97@163.com

通讯作者: 程镜蓉 (1988-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 农产品加工, E-mail: chengjingrong@gdaas.cn

retarding oxidation reaction of sausage during storage. However, there are few research reports on the related mechanisms of changing the flavor of sausage through regulating lipid oxidation and hydrolysis of sausages by mulberry polyphenols. In view of this, the mulberry polyphenol extract (1 g/kg) was added to minced meat to prepare Cantonese sausage, and the changes in lipid oxidation metabolites (conjugated diene, conjugated triene, TBARS and hexanal) and fatty acids (neutral fatty acids, free fatty acids and phospholipids) of the sausage were tracked during 28 days of storage. It was found that the mulberry polyphenols delayed lipid oxidation in sausage mainly through inhibiting lipid secondary metabolites (hexanal and malondialdehyde). After 28 days of storage, the contents of hexanal and malondialdehyde in sausage with mulberry polyphenols decreased by 63.10% and 28.05%, respectively, compared with the control. In addition, mulberry polyphenols could effectively inhibit the release of free fatty acids and phospholipids during sausage storage. After 28 days of storage, the content of free fatty acids in the sausage with mulberry polyphenols decreased by 9.59% compared with the control group. At the same time, mulberry polyphenols could also reduce the generation and accumulation of aldehydes in flavor substances. In summary, mulberry polyphenols mainly regulate the flavor of the sausage by delaying the lipid degradation and secondary oxidation during storage.

Key words: Cantonese sausage; mulberry polyphenols; lipid oxidation; lipid hydrolysis

在腊肠熟化过程中,肌肉和脂肪组织中的脂质水解和氧化是促进风味形成的重要途径^[1],是中式干发酵香肠风味形成的主要来源。有研究表明,腊肠中80%以上的挥发性风味物质来源于脂质氧化和水解^[2]。脂质水解是脂类物质转化为风味化合物的第一步,此过程会导致游离脂肪酸含量大幅度增加^[3]。脂质水解产物-游离脂肪酸又是脂质氧化的主要底物,因此,脂肪水解是风味形成的关键步骤^[1]。脂质水解是由脂肪酶催化的,如酸性脂肪酶、中性脂肪酶、或磷脂酶^[3]。其次,游离脂肪酸的氧化是风味化合物形成的重要环节,它产生大量不同的氢过氧化物,连同许多不同的分解途径,导致大量的挥发性化合物或风味前体物质的产生。随后,这些前体物质可与氨基酸、美拉德反应中间体或其他化合物反应,形成干腌肉制品特有的香气^[3]。脂质氧化包括自氧化和酶促氧化,通过脂肪氧化产生的挥发性化合物可以分为醇、醛、脂环烃、芳香烃、酮和直链烃^[4]等。

尽管脂质的氧化水解与干腌肉制品的风味息息相关,但过度的氧化往往会造成肉制品品质的劣变,甚至引发食品安全问题^[5]。脂质过氧化过程属于自由基链式反应,最初形成过氧化物;过氧化物非常不稳定,容易被进一步氧化并产生一些有害的物质,如醛、酮等^[2]。研究表明,不饱和脂肪的过氧化易造成腊肠的酸败和异味物质的产生,过氧化不仅会减少消费者的购买欲望^[5,6],而且会降低食物的营养和感官特性,使食物失去必需的脂肪酸和维生素,产生有毒化合物^[7,8]。与此同时,脂质过氧化也会引发肉中的蛋白质的氧化,造成肉制品营养流失和品质劣变^[1]。

为了有效控制肉制品的氧化,人们常常在腊肠等干腌肉制品中加入适量亚硝酸盐。然而,近年来这类传统抗氧化剂的长期食用被证实具有生物毒性和致癌风险,因此,人们开始关注天然健康的抗氧化剂的开

发。植物多酚是一类天然抗氧化剂;研究表明,将植物多酚添加到肉制品中,可以有效的延迟脂质氧化。Nowak等^[9]将樱桃和黑醋栗叶多酚提取物加入到猪肉香肠中,发现其可以显著抑制丙二醛的产生。Munekata等^[10]发现花生皮多酚提取物可以有效抑制鸡肉饼在冷藏期间的脂质氧化。桑椹是一种天然浆果类植物,挂果期短,采摘后若不及食用或加工就会腐烂,目前主要以鲜果、果酱、果酒的形式流通于市面^[11],附加值较低,但是从桑椹中提取的桑椹多酚具有很强的抗氧化性,并且附加值较高。我们前期研究发现,将桑椹多酚添加到广式腊肠中会对腊肠脂质氧化造成的挥发性风味及游离脂肪酸的积累产生显著影响,但是对相关影响机制的探究较少。鉴于此,本研究中我们将桑椹多酚添加到广式腊肠中,尝试从脂质氧化和水解层面解析其对腊肠风味的影响机制。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

本研究中桑椹多酚源于桑椹(大10品种),由课题组分离提纯得到^[11],总酚含量为:320.31 mg GAE/g;猪里脊肉、肥肉、白砂糖、食用盐等腊肠制作的原料均购自广州华润万家超市;白酒为泸州金杯酿酒厂老窖特曲52度白酒;甲醇、异丙醇、正己烷、NaOH、Na₂SO₄气相色谱-质谱联用仪使用的试剂均为色谱纯或优级纯,购自天津市科密欧化学试剂有限公司;内标物十七酸购于美国sigmaaldrich公司;C7~C40正构烷烃购于坛墨质检标准物质中心;异辛烷(分析纯)购于上海易恩化学技术有限公司;2-硫代巴比妥酸(TBA,分析纯)购于上海源叶生物科技有限公司;1,1,3,3-四乙氧基丙烷购于西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司;其他试剂均为分析纯,购自广州齐云生

物试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

T25D 均质机, 德国 IKA 集团; TGL-16M 冷冻高速离心机, 湖南湘仪实验室仪器开发有限公司; 氨基硅胶固相萃取柱, 德国 Simon 公司; 50/30 μm DVB/CAR PMDS 固相微萃取探头, 美国 sigmaaldrich 公司; 气象色谱-质谱联用仪 6980N-5975B, 美国安捷伦公司; 全自动氨基酸分析仪, 日本日立公司; 斩拌机, 广东东菱电器有限公司; 绞肉机, 广州旭众食品机械有限公司; 热泵干燥机, 广东微而信实业有限公司; 循环水真空泵, 巩义市予华仪器有限责任公司; 双光束紫外可见分光光度计 TU-1900, 北京普析通用仪器有限责任公司; 真空旋转蒸发器, 上海亚荣生化仪器厂。

1.3 试验方法

1.3.1 广式腊肠的制作

广式腊肠的制作参考 Xiang 等^[12]的方法, 稍加改动。广式腊肠配方如下: 瘦肉 (800 g)、肥肉 (200 g)、食盐 (30 g) 和白酒 (20 g)。其中, 空白组不加入任何抗氧化剂, 阳性对照组加入 0.1 g/kg 亚硝酸钠, 实验组加入 1 g/kg 桑椹多酚。将瘦肉与调料混合, 在搅拌机中搅拌 10 min 后, 加入肥肉, 继续搅拌 10 min 后灌肠, 用草绳将腊肠分成每段 10~15 cm 的小节, 将气泡扎破, 排除其中的空气。腊肠先在 20 $^{\circ}\text{C}$ 热泵烘烤 2 h (湿度 50%), 然后 50 $^{\circ}\text{C}$ 烘烤 36 h (前 30 h 湿度为 40%, 后 6 h 湿度为 30%)。分别在腊肠成熟后 (第 0 天) 及储藏 10 d 后取样, 储存于 -80 $^{\circ}\text{C}$ 。

1.3.2 脂肪的提取

油脂的提取参考 Folch 等^[13]的方法, 并适当改动。取 18 g 腊肠样品, 将其绞碎, 加入 220 mL 三氯甲烷-甲醇 (2:1) 溶液, 均质 (7 000 r/min, 1 min, 三次), 过滤, 向滤液中加入 0.2 倍体积的盐溶液 (包含 7.3 g/L NaCl, 0.5 g/L CaCl_2), 静置分层后, 取有机下层, 40 $^{\circ}\text{C}$ 真空旋蒸, 待有机试剂蒸发完毕后, 剩余的液体为油脂。

1.3.3 油脂中共轭二烯、共轭三烯含量的测定

在 232、268 nm 处的吸光值分别表示共轭二烯、共轭三烯含量。准确称取 0.1 g 油脂, 用异辛烷稀释。以异辛烷在 232、268 nm 处的吸光值作为空白对照, 在 232、268 nm 处测定样品吸光值。

1.3.4 广式腊肠中醛类物质的测量

将腊肠粉碎并混匀, 准确称取腊肠 2 g 置于 20 mL 萃取瓶中, 用固相微萃取探头插入样品上方, 80 $^{\circ}\text{C}$ 萃

取 60 min。随后收回探头, 迅速将探头插入 GC-MS 进样口, 在进样口 270 $^{\circ}\text{C}$ 下解析 5 min。

色谱条件: DB-5MS 色谱柱; 进样口温度: 270 $^{\circ}\text{C}$, 不分流; 载气为氦气, 流速 1 mL/min; 程序升温: 起始温度 35 $^{\circ}\text{C}$, 保持 5 min, 然后以 4 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率升温至 130 $^{\circ}\text{C}$, 保持 3 min, 再以 8 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率至 200 $^{\circ}\text{C}$, 保持 3 min, 最后以 12 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率升温至 250 $^{\circ}\text{C}$, 保持 5 min, 运行总时间 52.67 min。

质谱条件: EI 离子源, 离子源温度 230 $^{\circ}\text{C}$, 四级杆温度 150 $^{\circ}\text{C}$, 扫描质量范围: 30~450 u。

1.3.5 挥发性风味物质的定性和定量分析

定性分析: 未知挥发性化合物与检索谱库匹配, 并使用 C7~C40 正构烷烃混合标样进行 GC-MS 分析, 记录保留时间, 计算各化合物的卡瓦茨保留指数 (RI), 并与参考文献作对比, 从而确定化合物的种类。RI 的计算公式:

$$RI = 100n + \frac{100(t_x - t_n)}{t_{n+1} - t_n} \quad (1)$$

式中:

RI——卡瓦茨保留指数;

t_n, t_{n+1} ——碳原子数为 n 和 $n+1$ 的正构烷烃的出峰时间, min;

t_x ——被分析的风味化合物的出峰时间, min。

定量分析: 使用峰面积 ($\text{AU} \times 10^6$) 对挥发性风味物质进行定量分析。

1.3.6 广式腊肠中 TBARS 值的测量

TBARS 值的测量参考 Wang 等^[14]的方法, 并做适当修改。

取 5 g 样品, 加入 25 mL 7.5% 三氯乙酸 (V/V), 均质 (10 000 r/min, 30 s \times 2), 离心 (12 000 r/min, 5 min, 4 $^{\circ}\text{C}$), 过滤, 收集上清液, 取 2 mL 上清液, 加入 2 mL 0.02 mol/L TBA 溶液, 沸水浴反应 30 min, 532 nm 处测定吸光度值。

桑椹多酚在 532 nm 处可以检测到光吸收, 因此最终计算结果时需减去沸水浴之前上清液与 TBA 混合溶液在 532 nm 处的吸光值。

用 1,1,3,3-四乙氧基丙烷为标准品绘制标准曲线。

1.3.7 脂肪酸的测量

1.3.7.1 脂肪酸分离

脂肪酸的分离参考孙为正^[15]的方法。

1.3.7.2 脂肪酸甲酯化

向分离出的游离脂肪酸中加入十七酸内标物, 加入 2 mL 2% NaOH-CH₃OH 溶液 (m/V), 60 $^{\circ}\text{C}$ 水浴 30 min (每 10 min 震荡一次); 随后加入 2 mL 14% BF₃-CH₃OH 溶液 (m/m), 60 $^{\circ}\text{C}$ 水浴 2 min 后取出, 用流动水降至室温。加入 2 mL 正己烷 (色谱级) 和

5 mL 饱和 NaCl 溶液, 颠倒均匀后, 离心(10 000 r/min, 5 min)分层。吸取 2 mL 上清液至装有 1 g 无水 Na₂SO₄ 的离心管中, 摇匀, 离心(10 000 r/min, 3 min), 用 1 mL 一次性注射器吸取上清液, 经过有机滤膜过滤后转移至上样瓶中, 空白对照组 1 mL 正己烷(色谱级)。

1.3.7.3 气相色谱-质谱条件

色谱条件: DB-HeavyWax 色谱柱; 进样口温度: 260 °C, 分流比 20:1; 载气为氦气, 流速 1 mL/min; 程序升温: 起始温度 45 °C, 保持 1 min, 然后以 12 °C/min 的速率升温至 140 °C, 保持 0 min, 再以 3 °C/min 的速率至 230 °C, 保持 11 min, 运行总时间 49.92 min。

质谱条件: EI 离子源, 离子源温度 230 °C, 四级杆温度 150 °C, 扫描质量范围: 10~450 u。

1.3.8 数据分析

试验结果以平均值±标准差表示, 通过 SPSS 对数据进行分析, 通过 Origin 作图。

2 结果与讨论

2.1 桑椹多酚对广式腊肠共轭二烯、共轭三烯含量的影响

含量的影响

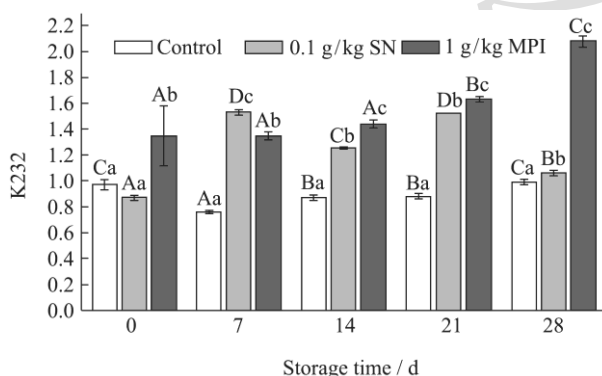


图1 桑椹多酚对广式腊肠油脂共轭二烯的影响

Fig.1 The influence of mulberry polyphenol on conjugated dienes of Cantonese sausage's lipid

注: SN 表示亚硝酸钠; MPI 表示桑椹多酚; a-c 表示在同一储藏期, 不同腊肠油脂间共轭二烯含量差异的显著性; A、B 表示相同的处理下, 不同储藏期的腊肠油脂间共轭二烯含量的显著性, 不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

图1和图2表示不同处理对腊肠油脂共轭二烯、共轭三烯含量的影响。多不饱和脂肪酸氧化随着过氧化氢的形成而发生, 过氧化物形成后, 天然不饱和脂质中的非共轭双键立即发生重排, 生成共轭二烯, 在 232 nm 处产生吸收峰。当含有三个或三个以上双键(如亚麻酸)的多不饱和脂肪酸发生氧化时, 共轭可

以扩展到包括另一个双键, 从而形成共轭三烯, 其在 268 nm 处产生吸收峰。用 K232 和 K268 量化的 232 和 268 nm 处的紫外吸光度变化已被用作氧化的相对量度, K232 和 K268 的增加与氧化早期的氧吸收和过氧化物的形成以及亚油酸的降解速率成正比^[16]。

由图1和图2可以看出, 随着储藏期的不断延长, 共轭二烯与共轭三烯含量呈现上升趋势, 这说明随着储藏期的进行, 腊肠中油脂氧化的程度逐渐加深。一般来说, 共轭二烯是评估脂质初级氧化程度的指标^[17]。从数据的整体趋势看, 添加亚硝酸钠和添加桑椹多酚组腊肠的共轭二烯含量显著高于空白对照组, 说明亚硝酸钠及桑椹多酚没有起到抑制腊肠中脂质初级氧化的作用。

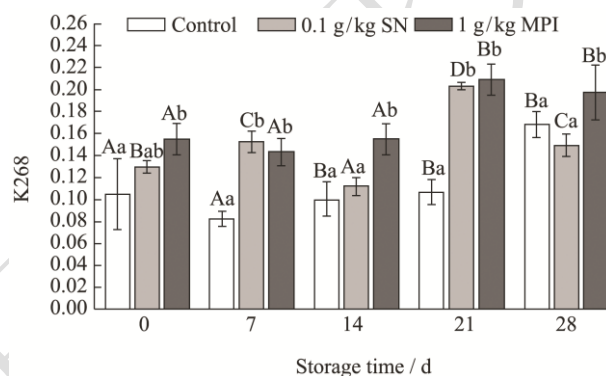


图2 桑椹多酚对广式腊肠油脂共三烯的影响

Fig.2 The influence of mulberry polyphenol on conjugated trienes of Cantonese sausage's lipid

2.2 桑椹多酚对广式腊肠己醛含量的影响

在油脂氧化过程中, 脂质氧化后产生的氢过氧化物分解产生次级氧化产物(脂肪醛、酮、醇、酸和烃), 这些产物会造成食用油的异常风味和口感^[18]。其中, 己醛是脂肪次级氧化的标志性产物, 是腌腊肉制品的主要风味物质之一^[19]。小分子的醛类物质有一定的刺激性气味, 对腊肠的风味有一定的负面影响^[20]。图3中的数据表示不同处理下腊肠中的己醛含量。从中可以看出, 随着储藏期的延长, 对照组与添加亚硝酸钠的腊肠中己醛含量逐渐增加。在 0 d, 只有对照组检测出己醛, 亚硝酸钠组和桑椹多酚组均未检测出己醛。亚硝酸钠组从 7 d 开始检测出了己醛, 但其己醛含量一直显著低于对照组, 桑椹多酚组直至 28 d 才检测出己醛。在 28 d, 对照组的己醛含量为 $164.89 \text{ AU} \times 10^6$, 而桑椹多酚组的己醛含量为 $60.84 \text{ AU} \times 10^6$ 。这说明桑椹多酚在抑制脂质次级氧化方面发挥了良好的作用, 其抑制效果甚至优于传统的抗氧化剂(亚硝酸钠)。此结果类似于 Ciriano 等^[21]的研究, 在此研究中, 加入了天然抗氧化剂(琉璃苣叶冻干提取物)的香肠的己醛含量显著低于合成抗氧化剂(BHA+BHA)组。

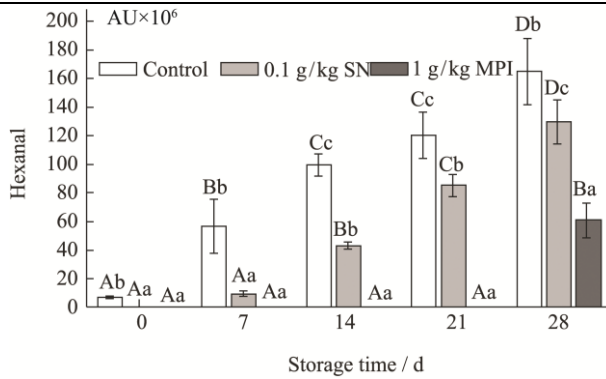


图3 不同处理对广式腊肠中己醛含量的影响

Fig.3 The influence of mulberry polyphenol on the hexanal content of Cantonese sausage

2.3 桑椹多酚对广式腊肠 TBARS 的影响

丙二醛 (TBA) 是脂质氧化的二级产物, 它是由脂质氢过氧化物降解产生, 通常用于检测脂质氧化的二级产物^[22]。两分子的 TBA 与饱和脂肪酸反应生成红色化合物, 其产生的有色物质在 530 nm 处具有最大吸收^[23]。在脂质氧化评价中, TBARS 值是反映脂质氧化程度最常用的参数, 它也是脂质的次级氧化产物^[24], TBARS 值主要是反映丙二醛含量^[2]。

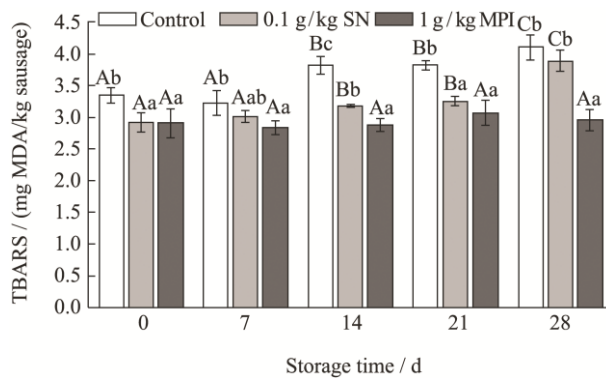


图4 桑椹多酚对广式腊肠 TBARS 值的影响

Fig.4 The influence of mulberry polyphenol on TBARS value of Cantonese sausage

图 4 显示了在储藏期中不同处理下的腊肠 TBARS 值的变化, 由图中可以看出, 在 0 d, 各组之间的 TBARS 值没有显著差异。在 7 d, 尽管亚硝酸组与对照组之间 TBARS 无显著差异, 但是, 桑椹多酚组的 TBARS 值显著低于对照组。在 14 d 及 14 d 之后, 各组之间均呈现一种差异, 即亚硝酸组的 TBARS 显著小于空白对照组 ($P < 0.05$), 桑椹多酚组 TBARS 值显著低于对照组与亚硝酸组 ($P < 0.05$)。并且, 由图中的数据可以看出, 除桑椹多酚组之外, 对照组与亚硝酸组的 TBARS 值均随着储藏期的延迟而呈现明显上升

的趋势。此结果与图 3 中的数据相对应, 这说明桑椹多酚起到了良好的抗油脂氧化效果。这可能因为酚类化合物不仅能够提供氢或电子, 还具有稳定的自由基中间体, 可以防止腊肠中油脂的氧化^[16]。Zhang 等^[23]的研究中也观察到了同样的现象, 发现加入了咖啡酸显著降低了核桃油的 TBARS 值。Almeida 等^[25]研究指出酚类化合物芳香环上的羟基能与氢原子一起提供电子并中和自由基, 从而阻止诸如丙二醛等活性氧化剂的进一步降解。

2.4 桑椹多酚对广式腊肠中性脂肪酸、游离脂肪酸和磷脂含量的影响

不同处理组的腊肠中性脂肪酸、游离脂肪酸、磷脂的含量变化分别详见表 1、2 和 3 所示。如表 1 所示, 在空白组与亚硝酸钠组, 中性脂肪酸经过 28 d 的储藏期后, 呈现了一个明显下降的趋势, 而桑椹多酚组的中性脂肪酸含量无显著变化, 说明桑椹多酚组起到了抑制中性脂肪酸含量下降的作用。其中, 经过 28 d 的储藏期后, 空白组、亚硝酸组和桑椹多酚组的单不饱和脂肪酸均呈现一个明显下降的趋势, 这可能是因为腊肠对氧化的高度敏感性。

游离脂肪酸由脂肪水解产生, 是脂质氧化的主要底物^[1]。游离脂肪酸的氧化是脂质转化为有香味化合物的第二步, 它产生大量不同的氢过氧化物, 连同许多不同的分解途径, 导致大量的挥发性化合物或香味前体物。这些前体物质可随后与氨基酸、美拉德反应中间体或其他化合物反应, 形成干腌肉制品特有的香气^[3]。

不同处理组的腊肠游离脂肪酸的含量变化如表 2 所示, 经过 28 d 的储藏期后, 空白对照组的总游离脂肪酸含量显著上升, 而亚硝酸钠组和桑椹多酚组的游离脂肪酸总量无显著变化, 这说明亚硝酸钠与桑椹多酚均起到了明显的抑制游离脂肪酸含量释放的作用。Guo 等^[17]在研究中也观察到迷迭香提取物可以抑制油脂油炸过程油脂中游离脂肪酸的产生。在油炸 5 d 后, 未经处理的棕榈油样品游离脂肪酸含量 (1.41%), 远高于迷迭香提取物处理过的棕榈油 (0.99%)。同时, 在我们之前的实验中也观察到同样的现象^[26], 经过 10 d 的储藏期后, 添加了亚硝酸钠和桑椹多酚的腊肠的肥丁和肌肉部分的游离脂肪酸含量显著低于空白对照组。肌肉酶系统在游离脂肪酸的产生中起着重要作用^[27], 亚硝酸钠和桑椹多酚可能是通过抑制肌肉酶的活力从而抑制游离脂肪酸的积累。

表 1 桑椹多酚对广式腊肠中性脂肪酸的影响 (mg/g 脂肪)

Table 1 The influence of mulberry polyphenol on natural fatty acid of Cantones sausage (mg/g fat)

项目	0 d			28 d		
	Control	0.1 g/kg SN	1 g/kg MPI	Control	0.1 g/kg SN	1 g/kg MPI
C12:0	0.01±0.00 ^{Aa}	0.01±0.00 ^{Aa}	0.01±0.00 ^{Aa}	0.01±0.00 ^{Aa}	0.01±0.00 ^{Aa}	0.01±0.00 ^{Aa}
C14:0	0.13±0.00 ^{Ba}	0.13±0.00 ^{Ba}	0.13±0.00 ^{Aa}	0.12±0.00 ^{Aa}	0.12±0.00 ^{Aa}	0.12±0.00 ^{Aa}
C16:0	2.28±0.02 ^{Bab}	2.31±0.01 ^{Bb}	2.25±0.04 ^{Ba}	2.19±0.04 ^{Aa}	2.19±0.03 ^{Aa}	2.14±0.06 ^{Aa}
C18:0	1.43±0.00 ^{Bb}	1.43±0.00 ^{Bb}	1.41±0.02 ^{Aa}	1.40±0.02 ^{Aa}	1.39±0.03 ^{Aa}	1.42±0.02 ^{Aa}
C20:0	0.03±0.00 ^{Ba}	0.03±0.00 ^{Ba}	0.03±0.00 ^{Aa}	0.03±0.00 ^{Aa}	0.03±0.00 ^{Aa}	0.03±0.00 ^{Ab}
∑SFA	3.88±0.02 ^{Bb}	3.91±0.01 ^{Bb}	3.81±0.07 ^{Aa}	3.75±0.06 ^{Aa}	3.74±0.05 ^{Aa}	3.71±0.08 ^{Aa}
C16:1	0.23±0.00 ^{Ba}	0.24±0.00 ^{Bb}	0.23±0.00 ^{Ba}	0.22±0.00 ^{Aa}	0.22±0.00 ^{Aa}	0.22±0.00 ^{Aa}
C18:1	3.91±0.03 ^{Bb}	3.97±0.02 ^{Bb}	3.82±0.07 ^{Ba}	3.74±0.07 ^{Aa}	3.73±0.07 ^{Aa}	3.61±0.11 ^{Aa}
C20:1	0.14±0.00 ^{Ba}	0.14±0.00 ^{Ba}	0.14±0.01 ^{Aa}	0.14±0.00 ^{Aa}	0.14±0.00 ^{Aa}	0.14±0.00 ^{Aa}
∑MUFA	4.28±0.03 ^{Bb}	4.36±0.02 ^{Bb}	4.20±0.08 ^{Ba}	4.10±0.08 ^{Aa}	4.09±0.07 ^{Aa}	3.97±0.12 ^{Aa}
C18:2	0.94±0.00 ^{Aab}	0.94±0.01 ^{Ab}	0.92±0.02 ^{Aa}	0.95±0.02 ^{Ab}	0.94±0.01 ^{Ab}	0.91±0.02 ^{Aa}
C18:3	0.04±0.00 ^{Ab}	0.04±0.00 ^{Aab}	0.04±0.00 ^{Aa}	0.05±0.00 ^{Bb}	0.05±0.00 ^{Bb}	0.04±0.00 ^{Aa}
C20:2	0.06±0.00 ^{Aa}	0.06±0.00 ^{Aa}	0.06±0.00 ^{Aa}	0.06±0.00 ^{Bb}	0.06±0.00 ^{Aa}	0.06±0.00 ^{Aab}
C20:3	0.02±0.00 ^{Aa}	0.02±0.00 ^{Aa}	0.02±0.00 ^{Aa}	0.02±0.00 ^{Ba}	0.02±0.00 ^{Aa}	0.02±0.00 ^{Aa}
C20:4	0.02±0.00 ^{Ab}	0.02±0.00 ^{Ab}	0.02±0.00 ^{Aa}	0.02±0.00 ^{Bc}	0.02±0.00 ^{Bb}	0.02±0.00 ^{Ba}
∑PUFA	1.08±0.00 ^{Ab}	1.08±0.01 ^{Ab}	1.06±0.02 ^{Aa}	1.10±0.02 ^{Bb}	1.08±0.01 ^{Ab}	1.05±0.02 ^{Aa}
SUM	9.24±0.05 ^{Bb}	9.34±0.03 ^{Bb}	9.07±0.16 ^{Aa}	8.96±0.15 ^{Aa}	8.91±0.12 ^{Aa}	8.74±0.22 ^{Aa}

注: SN 表示亚硝酸钠; MPI 表示桑椹多酚; a~c 表示在同一储藏期, 不同腊肠油脂间脂肪酸含量差异的显著性; A、B 表示相同的处理下, 不同储藏期的腊肠油脂间脂肪酸含量的显著性, 不同字母表示差异显著 (P<0.05)。下表同。

表 2 桑椹多酚对广式腊肠游离脂肪酸的影响 (mg/g 脂肪)

Table 2 The influence of mulberry polyphenol on free fatty acid of Cantones sausage (mg/g fat)

项目	0 d			28 d		
	Control	0.1 g/kg SN	1 g/kg MPI	Control	0.1 g/kg SN	1 g/kg MPI
C12:0	0.01±0.00 ^{Aa}	0.01±0.00 ^{Aa}	0.01±0.00 ^{Ba}	0.01±0.00 ^{Bb}	0.01±0.00 ^{Aa}	0.01±0.00 ^{Aa}
C14:0	0.13±0.00 ^{Aa}	0.13±0.00 ^{Ba}	0.13±0.00 ^{Ba}	0.14±0.01 ^{Bb}	0.12±0.00 ^{Aa}	0.12±0.00 ^{Aa}
C16:0	2.29±0.03 ^{Aa}	2.29±0.03 ^{Aa}	2.26±0.03 ^{Aa}	2.46±0.06 ^{Bb}	2.26±0.03 ^{Ab}	2.25±0.01 ^{Ab}
C18:0	1.43±0.01 ^{Aa}	1.42±0.01 ^{Aa}	1.44±0.01 ^{Aa}	1.60±0.03 ^{Bb}	1.44±0.01 ^{Ba}	1.45±0.01 ^{Aa}
C20:0	0.03±0.00 ^{Aa}	0.03±0.00 ^{Ba}	0.03±0.00 ^{Bb}	0.03±0.00 ^{Bb}	0.03±0.00 ^{Aa}	0.03±0.00 ^{Aa}
∑SFA	3.88±0.04 ^{Aa}	3.88±0.04 ^{Aa}	3.86±0.04 ^{Aa}	4.24±0.04 ^{Bb}	3.86±0.03 ^{Aa}	3.86±0.01 ^{Aa}
C16:1	0.23±0.00 ^{Aa}	0.24±0.00 ^{Bb}	0.23±0.00 ^{Aa}	0.24±0.01 ^{Ab}	0.23±0.00 ^{Ab}	0.23±0.00 ^{Ab}
C18:1	3.92±0.04 ^{Aab}	3.96±0.04 ^{Bb}	3.87±0.05 ^{Ba}	4.19±0.10 ^{Bb}	3.83±0.05 ^{Aa}	3.80±0.02 ^{Aa}
C20:1	0.14±0.00 ^{Aa}	0.14±0.00 ^{Ba}	0.14±0.00 ^{Bb}	0.16±0.01 ^{Bb}	0.14±0.00 ^{Aa}	0.14±0.00 ^{Aa}
∑MUFA	4.29±0.04 ^{Aab}	4.34±0.04 ^{Bb}	4.25±0.06 ^{Ba}	4.60±0.10 ^{Bb}	4.20±0.05 ^{Aa}	4.17±0.02 ^{Aa}
C18:2	0.94±0.01 ^{Aa}	0.93±0.01 ^{Aa}	0.94±0.01 ^{Aa}	1.10±0.03 ^{Bb}	0.99±0.01 ^{Ba}	0.97±0.01 ^{Ba}
C18:3	0.04±0.00 ^{Ab}	0.04±0.00 ^{Aa}	0.04±0.00 ^{Aa}	0.05±0.00 ^{Bc}	0.05±0.00 ^{Ba}	0.04±0.00 ^{Aa}
C20:2	0.06±0.00 ^{Ab}	0.06±0.00 ^{Aa}	0.06±0.00 ^{Ab}	0.07±0.00 ^{Bb}	0.07±0.00 ^{Ba}	0.06±0.00 ^{Aa}
C20:3	0.02±0.00 ^{Aa}	0.02±0.00 ^{Aa}	0.02±0.00 ^{Aa}	0.02±0.00 ^{Bb}	0.02±0.00 ^{Ba}	0.02±0.00 ^{Ba}
C20:4	0.02±0.00 ^{Ac}	0.02±0.00 ^{Ab}	0.02±0.00 ^{Aa}	0.03±0.00 ^{Bc}	0.02±0.00 ^{Bb}	0.02±0.00 ^{Ba}
∑PUFA	1.09±0.01 ^{Aa}	1.08±0.01 ^{Aa}	1.08±0.01 ^{Aa}	1.27±0.04 ^{Bb}	1.15±0.01 ^{Ba}	1.12±0.01 ^{Ba}
SUM	9.27±0.09 ^{Aa}	9.30±0.09 ^{Aa}	9.19±0.10 ^{Aa}	10.11±0.12 ^{Bb}	9.21±0.10 ^{Aa}	9.14±0.03 ^{Aa}

表3 桑椹多酚对广式腊肠磷脂的影响 (mg/g 脂肪)

项目	0 d			28 d		
	Control	0.1 g/kg SN	1 g/kg MPI	Control	0.1 g/kg SN	1 g/kg MPI
C12:0	0.01±0.00 ^{Aa}	0.01±0.00 ^{Aa}	0.01±0.00 ^{Aa}	0.01±0.00 ^{Aa}	0.01±0.00 ^{Aa}	0.01±0.00 ^{Aa}
C14:0	0.13±0.00 ^{Aa}	0.15±0.00 ^{Ab}	0.15±0.01 ^{Ab}	0.15±0.00 ^{Ba}	0.15±0.00 ^{Aa}	0.14±0.00 ^{Aa}
C16:0	2.19±0.11 ^{Aa}	2.36±0.04 ^{Aa}	2.30±0.15 ^{Aa}	2.32±0.03 ^{Ab}	2.31±0.04 ^{Ab}	2.25±0.02 ^{Aa}
C18:0	1.21±0.08 ^{Aa}	1.27±0.03 ^{Aa}	1.30±0.03 ^{Ba}	1.27±0.01 ^{Ab}	1.26±0.01 ^{Ab}	1.22±0.02 ^{Aa}
C20:0	0.02±0.00 ^{Aa}	0.02±0.00 ^{Aa}	0.02±0.00 ^{Aa}	0.02±0.00 ^{Aa}	0.02±0.00 ^{Aa}	0.02±0.00 ^{Ab}
∑SFA	3.57±0.19 ^{Aa}	3.81±0.07 ^{Aa}	3.78±0.19 ^{Aa}	3.77±0.05 ^{Ab}	3.75±0.05 ^{Ab}	3.65±0.05 ^{Aa}
C16:1	0.23±0.00 ^{Aa}	0.26±0.00 ^{Ab}	0.26±0.02 ^{Ab}	0.25±0.00 ^{Ba}	0.26±0.01 ^{Aa}	0.25±0.00 ^{Aa}
C18:1	3.63±0.15 ^{Aa}	3.96±0.08 ^{Ab}	3.96±0.10 ^{Bb}	3.89±0.03 ^{Ab}	3.93±0.04 ^{Ab}	3.81±0.05 ^{Aa}
C20:1	0.11±0.00 ^{Aa}	0.11±0.01 ^{Aa}	0.11±0.01 ^{Aa}	0.12±0.00 ^{Bb}	0.12±0.00 ^{Ab}	0.11±0.00 ^{Aa}
∑MUFA	3.97±0.16 ^{Aa}	4.33±0.09 ^{Ab}	4.33±0.12 ^{Ab}	4.26±0.03 ^{Ab}	4.30±0.04 ^{Ab}	4.18±0.05 ^{Aa}
C18:2	0.99±0.07 ^{Aa}	1.11±0.03 ^{Ab}	1.15±0.02 ^{Bb}	1.22±0.03 ^{Bc}	1.18±0.01 ^{Bb}	1.11±0.01 ^{Aa}
C18:3	0.05±0.01 ^{Aa}	0.05±0.00 ^{Aa}	0.05±0.00 ^{Aa}	0.06±0.00 ^{Bc}	0.06±0.00 ^{Bb}	0.05±0.00 ^{Aa}
C20:2	0.06±0.00 ^{Aa}	0.06±0.00 ^{Ab}	0.07±0.00 ^{Ab}	0.07±0.00 ^{Bb}	0.07±0.00 ^{Ba}	0.07±0.00 ^{Aa}
C20:3	0.02±0.00 ^{Aa}	0.03±0.00 ^{Ab}	0.03±0.00 ^{Ab}	0.03±0.00 ^{Bb}	0.03±0.00 ^{Ab}	0.03±0.00 ^{Aa}
C20:4	0.07±0.01 ^{Aa}	0.08±0.00 ^{Aa}	0.08±0.01 ^{Ba}	0.09±0.00 ^{Ac}	0.08±0.00 ^{Ab}	0.06±0.00 ^{Aa}
∑PUFA	1.19±0.09 ^{Aa}	1.33±0.03 ^{Ab}	1.37±0.02 ^{Bb}	1.47±0.03 ^{Bc}	1.41±0.01 ^{Bb}	1.31±0.02 ^{Aa}
SUM	8.72±0.25 ^{Aa}	9.43±0.19 ^{Ab}	9.48±0.30 ^{Ab}	9.50±0.11 ^{Bb}	9.46±0.10 ^{Ab}	9.14±0.11 ^{Aa}

虽然亚硝酸钠和桑椹多酚可以显著抑制总游离脂肪酸的产生,但是从多不饱和脂肪酸的数据可以看出,亚硝酸钠和桑椹多酚都可以起到促进多不饱和脂肪酸释放的作用。与单不饱和脂肪酸相比,长链多不饱和脂肪酸对氧化的稳定性较差^[28]。多不饱和脂肪酸也可以被视为肉类氧化状态的指标,因为它们的双键是氧化反应的首选底物。酚中的羟基通过拦截自由基形成稳定的终产物,中断并避免进一步的脂质氧化,尤其是不饱和脂肪酸的氧化。亚硝酸盐通过形成肌红蛋白稳定的化合物,使铁离子无法氧化,从而发挥抗氧化活性^[29]。饱和脂肪酸可提高血液胆固醇水平,而多不饱和脂肪酸可降低血液胆固醇水平,并具有降低低密度脂蛋白胆固醇的作用,后者是导致动脉硬化的重要原因^[30]。虽然这三组腊肠经过 28 d 的储藏期后,多不饱和脂肪酸的脂肪酸含量均显著提高,但是只有空白组的饱和脂肪酸含量经过 28 d 的储藏期后显著提高,说明在肉类产品的制造过程中,加入一些抗氧化剂对人类的心血管健康是非常有必要的。

磷脂是细胞膜的重要组成部分,在二十烷类代谢中起前体作用,而中性脂类主要作为脂质的储存库,用作能源^[31]。如表 3 所示,经过 28 d 的储藏期后,空白对照组的总磷脂含量显著上升,而亚硝酸钠组和桑椹多酚组的总磷脂含量无显著变化,此变化趋势与游离脂肪酸的变化趋势类似,这说明亚硝酸钠与桑椹多

酚均起到了明显的抑制磷脂释放的作用,二者均是风味物质的前体。

2.5 桑椹多酚对广式腊肠中醛类物质含量的影响

表4 桑椹多酚对广式腊肠醛类物质的影响

醛类物质	Control	0.1 g/kg SN	1 g/kg MPI
己醛	164.89±23.15 ^c	134.67±7.44 ^b	61.74±12.66 ^a
2-庚醛	21.61±3.45 ^b	8.58±0.50 ^a	11.79±1.81 ^a
苯甲醛	13.50±1.22 ^b	9.93±1.07 ^a	8.43±2.83 ^a
苯乙醛	10.73±1.51 ^a	10.86±2.04 ^a	9.60±0.78 ^a
2-辛烯醛	40.51±4.58 ^b	40.43±2.71 ^b	11.16±1.58 ^a
壬醛	49.91±5.06 ^c	9.83±1.23 ^a	27.08±1.69 ^b
2-壬烯醛	21.66±2.82 ^b	6.25±0.99 ^a	8.29±0.40 ^a
2,4-壬二烯醛	13.29±2.36 ^b	-	6.10±0.88 ^a
2,4-癸二烯醛	17.30±3.04 ^b	6.14±0.53 ^a	5.50±0.62 ^a
十四烷醛	9.13±0.88 ^a	8.48±2.03 ^a	8.81±0.74 ^a

脂质氧化在风味特征的形成过程中起着重要的作用,脂质氧化产生的大多数挥发性化合物(如己醛、辛醛和壬醛)的 OAV 值(Odor Activity Value, 气味活性值)较高,对腊肠风味产生影响^[32]。其中己醛具

有新鲜的青草气味^[33], 是腌腊肉制品的主要风味物质之一, 是亚油酸氧化产物^[33], 2,4-癸二烯醛化合物这些化合物是由亚麻油酸 (C18:3) 和亚麻酸 (C18:2) 的降解产生的^[19]。由表 4 中的数据可以看出, 空白对照组的醛类物质含量显著高于桑椹多酚组, 说明桑椹多酚通过抑制脂质氧化显著抑制了己醛、2-庚醛和苯甲醛等醛类物质的含量。Munekata 等^[34]的研究也同样发现天然抗氧化剂和合成抗氧化剂均降低了肉制品中挥发性风味物质中总醛的含量。

3 结论

本文从广式腊肠脂质的水解和氧化的角度探究了桑椹多酚对广式腊肠风味品质的影响。研究发现, 桑椹多酚对腊肠脂质氧化的抑制作用主要在于延缓腊肠脂质次级氧化过程。在腊肠储藏过程中, 桑椹多酚的加入能显著延缓脂质次级氧化产物 (己醛和丙二醛) 和脂质水解产物 (游离脂肪酸、中性脂肪酸以及磷脂) 的积累与释放, 抑制醛类物质 (己醛、2-庚醛、苯甲醛和丙二醛等) 的积累。经过 28 d 的储藏期后, 桑椹腊肠中己醛与丙二醛的含量较对照组分别下降 63.10% 与 28.05%。该研究结果有助于丰富人们关于植物多酚对肉制品脂质氧化调控的认识, 指导食品工作者合理地使用植物多酚调控食品品质。

参考文献

- [1] Chen Q, Kong B, Han Q, et al. The role of bacterial fermentation in lipolysis and lipid oxidation in Harbin dry sausages and its flavour development [J]. LWT - Food Science and Technology, 2017, 77: 389-396.
- [2] Zhao B, Zhou H, Zhang S, et al. Changes of protein oxidation, lipid oxidation and lipolysis in Chinese dry sausage with different sodium chloride curing salt content [J]. Food Science and Human Wellness, 2020, 9(4): 328-337.
- [3] Huang Y, Li H, Huang T, et al. Lipolysis and lipid oxidation during processing of Chinese traditional smoke-cured bacon [J]. Food Chemistry, 2014, 149: 31-39.
- [4] Pateiro M, Franco D, Carril J A, et al. Changes on physico-chemical properties, lipid oxidation and volatile compounds during the manufacture of celta dry-cured loin [J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(8): 4808-4818.
- [5] Gu X, Sun Y, Tu K, et al. Evaluation of lipid oxidation of Chinese-style sausage during processing and storage based on electronic nose [J]. Meat Science, 2017, 133: 1-9.
- [6] Brannan R G, Mah E. Grape seed extract inhibits lipid oxidation in muscle from different species during refrigerated and frozen storage and oxidation catalyzed by peroxy nitrite and iron/ascorbate in a pyrogallol red model system [J]. Meat Science, 2007, 77(4): 540-546.
- [7] Est évez M, Cava R. Effectiveness of rosemary essential oil as an inhibitor of lipid and protein oxidation: Contradictory effects in different types of frankfurters [J]. Meat Science, 2006, 72(2): 348-355.
- [8] Ganh ão R, Est évez M, Armenteros M, et al. Mediterranean berries as inhibitors of lipid oxidation in porcine burger patties subjected to cooking and chilled storage [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(11): 1982-1992.
- [9] Nowak A, Czyzowska A, Efenberger M, et al. Polyphenolic extracts of cherry (*Prunus cerasus* L.) and blackcurrant (*Ribes nigrum* L.) leaves as natural preservatives in meat products [J]. Food Microbiology, 2016, 59: 142-149.
- [10] Munekata P E S, Calomeni A V, Rodrigues C E C, et al. Peanut skin extract reduces lipid oxidation in cooked chicken patties [J]. Poultry Science, 2015, 94: 442-446.
- [11] 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[M]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [12] Xiang R, Cheng J R, Zhu M J, et al. Effect of mulberry (*Morus alba*) polyphenols as antioxidant on physicochemical properties, oxidation and bio-safety in Cantonese sausages [J]. LWT - Food Science and Technology, 2019, 116: 108504.
- [13] Folch B J, Lees M, Stanley G H S. A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues [J]. The Journal of Biological Chemistry, 1957, 226(1): 497-509.
- [14] Wang Y, Li F, Zhuang H, et al. Effects of plant polyphenols and α -tocopherol on lipid oxidation, residual nitrites, biogenic amines, and N-nitrosamines formation during ripening and storage of dry-cured bacon [J]. LWT - Food Science and Technology, 2015, 60(1): 199-206.
- [15] 孙为正. 广式腊肠加工过程中脂质水解、蛋白质降解及风味成分变化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [16] Poiana M. Enhancing oxidative stability of sunflower oil during convective and microwave heating using grape seed extract [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2012, 13(7): 9240-9259.
- [17] Guo Q, Gao S, Sun Y, et al. Antioxidant efficacy of rosemary ethanol extract in palm oil during frying and accelerated storage [J]. Industrial Crops and Products, 2016, 94: 82-88.
- [18] Farhoosh R, Moosavi S M R. Evaluating the performance of peroxide and conjugated diene values in monitoring quality

- of used frying oils [J]. Journal of Agricultural Sciences and Technology, 2009, 11: 173-179.
- [19] Olivares A, Navarro J L, Flores M. Effect of fat content on aroma generation during processing of dry fermented sausages [J]. Meat Science, 2011, 87(3): 264-273.
- [20] 唐玲.广式腊肠储藏期间脂质水解氧化与风味成分相关性研究[M].广州:暨南大学,2011.
- [21] Ciriano M G D, Garc ía-Herreros C, Larequi E, et al. Use of natural antioxidants from lyophilized water extracts of *Borago officinalis* in dry fermented sausages enriched in ω -3 PUFA [J]. Meat Science, 2009, 83(2): 271-277.
- [22] Meroni E, Raikos V. Physicochemical stability, antioxidant properties and bioaccessibility of β -carotene in orange oil-in-water beverage emulsions: influence of carrier oil types [J]. Food & Function, 2018, 9: 320-330.
- [23] Zhang Y, Zhang F, Thakur K, et al. Effect of natural polyphenol on the oxidative stability of pecan oil [J]. Food and Chemical Toxicology, 2018, 119: 489-495.
- [24] Bian H, Ma J, Geng Z, et al. Changes of hydroxyl-linoleic acids during Chinese-style sausage processing and their relationships with lipids oxidation [J]. Food Chemistry, 2019, 296: 63-68.
- [25] De Almeida P L, De Lima S N, Costa L L, et al. Effect of jabuticaba peel extract on lipid oxidation, microbial stability and sensory properties of Bologna-type sausages during refrigerated storage [J]. Meat Science, 2015, 110: 9-14.
- [26] 候雨雪,刘学铭,程镜蓉,等.桑椹多酚对广式腊肠风味的影响[J].现代食品科技.2022,38(8):236-246,52.
- [27] Lorenzo J M. Changes on physico-chemical, textural, lipolysis and volatile compounds during the manufacture of dry-cured foal "cecina" [J]. Meat Science, 2014, 96(1): 256-263.
- [28] Vossen E, Utrera M, De Smet S, et al. Dog rose (*Rosa canina* L.) as a functional ingredient in porcine frankfurters without added sodium ascorbate and sodium nitrite [J]. Meat Science, 2012, 92(4): 451-457.
- [29] Aquilani C, Sirtori F, Flores M, et al. Effect of natural antioxidants from grape seed and chestnut in combination with hydroxytyrosol, as sodium nitrite substitutes in Cinta Senese dry-fermented sausages [J]. Meat Science, 2018, 145: 389-398.
- [30] Yu Y, Wang G, Yin X, et al. Effects of different cooking methods on free fatty acid profile, water-soluble compounds and flavor compounds in Chinese Piao chicken meat [J]. Food Research International, 2021, 149: 110696.
- [31] Petenuci M E, Lopes A P, Camparim R, et al. Fatty acid composition in fractions of neutral lipids and phospholipids of *Hemisorubim platyrhynchos* with seasonal distinction [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2021, 99: 103885.
- [32] Wen R, Hu Y, Zhang L, et al. Effect of NaCl substitutes on lipid and protein oxidation and flavor development of Harbin dry sausage [J]. Meat Science, 2019, 156: 33-43.
- [33] Hu Y, Zhang L, Zhang H, et al. Physicochemical properties and flavour profile of fermented dry sausages with a reduction of sodium chloride [J]. LWT - Food Science and Technology, 2020, 124: 109061.
- [34] Munekata P E S, Dom ínguez R, Franco D, et al. Effect of natural antioxidants in Spanish salchichón elaborated with encapsulated n-3 long chain fatty acids in konjac glucomannan matrix [J]. Meat Science, 2017, 124: 54-60.