

王颂萍, 钟强, 杨欣悦, 等. 多酚抑制脂肪氧化的作用机理及其在肉制品中应用的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(10): 417-425. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021050187

WANG Songping, ZHONG Qiang, YANG Xinyue, et al. Mechanism of Polyphenols Inhibiting Lipid Oxidation and Its Development in Meat Products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(10): 417-425. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021050187

· 专题综述 ·

多酚抑制脂肪氧化的作用机理及其在肉制品中应用的研究进展

王颂萍¹, 钟强², 杨欣悦², 万伟², 李芳菲^{3,*}, 夏秀芳^{2,*}

(1. 河北工程大学科信学院, 河北邯郸 056038;

2. 东北农业大学食品学院, 黑龙江哈尔滨 150030;

3. 东北林业大学林学院, 黑龙江哈尔滨 150040)

摘要: 多酚是植物的次生代谢产物, 其种类多样、结构复杂, 是一类天然无毒的氧化抑制剂, 可通过螯合金属离子、清除自由基及羰基化合物来抑制脂肪氧化, 被广泛用于肉制品的储藏研究, 提高了肉制品的品质并延长货架期。本文总结了脂肪氧化的过程及多酚抑制脂肪氧化的作用机理, 并结合近年来国内外的研究概况对多酚在肉制品中抑制脂肪氧化的应用进展进行了综述。最后, 对其应用前景进行了展望, 以期为推进多酚应用于抑制肉制品脂肪氧化提供一定的理论指导。

关键词: 肉制品, 脂肪氧化, 多酚, 抑制机理, 应用进展

中图分类号: TS251.5

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)10-0417-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021050187

本文网刊:



Mechanism of Polyphenols Inhibiting Lipid Oxidation and Its Development in Meat Products

WANG Songping¹, ZHONG Qiang², YANG Xinyue², WAN Wei², LI Fangfei^{3,*}, XIA Xiufang^{2,*}

(1. Kexin College, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

2. College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;

3. College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: Polyphenol is a kind of natural non-toxic oxidation inhibitor, which can inhibit lipid oxidation by chelating metal ions, scavenging free radicals and carbonyl compounds. It is widely used in storage research of meat products, improving the quality of meat products and extending the shelf life. In this paper, the process of lipid oxidation and the mechanism of polyphenols inhibiting lipid oxidation are summarized, and the application progress of polyphenols in inhibiting lipid oxidation in meat products is reviewed. Finally, the application prospect of polyphenols in meat products is prospected in order to provide some theoretical guidance for promoting the application of polyphenols in preventing lipid oxidation.

Key words: meat products; lipid oxidation; polyphenols; inhibition mechanism; application progress

肉制品中因含有丰富的蛋白质、必需氨基酸、维生素 B、矿物质等营养物质而在人类饮食中占有重要地位^[1], 然而在加工和储藏过程中, 由于不饱和脂

肪酸和胆固醇的占比较大, 肉中脂肪极易发生氧化, 此外, 切碎和烹饪过程有助于游离脂肪酸与氧气之间的接触, 从而促进脂肪氧化。脂肪氧化不仅导致肉制

收稿日期: 2021-05-21

基金项目: 国家自然科学基金(面上项目)(32172273)。

作者简介: 王颂萍(1976-), 女, 硕士, 副教授, 研究方向: 食品安全, E-mail: 297868536@qq.com。

* 通信作者: 李芳菲(1993-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 畜产品加工工程, E-mail: lifangfei33@163.com。

夏秀芳(1973-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 畜产品加工工程, E-mail: Xxfang524@163.com。

品产生酸败味,也会引起蛋白氧化,使肉色变暗^[2]。此外,脂质氧化后会形成醛类等有毒化合物,引起阿尔茨海默症^[3]、帕金森^[4]和肝癌^[5]等疾病的发生,影响消费者的身体健康及生活质量。因此,抑制脂质氧化的重要性不言而喻。

肉制品的加工企业通常使用丁基羟基茴香醚(BHA)、丁基羟基甲苯(BHT)或叔丁基羟基奎宁(TBHQ)等合成的抗氧化剂来抑制肉制品中的脂质氧化并延长产品货架期^[6-7],但近年来消费者越来越担心这些合成抗氧化剂的潜在毒理作用,因此在肉类产品中添加天然抗氧化剂也逐步成为了开发健康、新颖肉制品的重要策略。多酚是植物的次生代谢产物^[8],具有天然、安全、无毒的特点。研究发现其大多具有螯合过渡金属离子和清除自由基的作用,从而阻止了肉制品自动氧化的过程^[9]。此外,酚类化合物还能够清除脂肪氧化途径中产生的羰基化合物^[10],为肉制品提供了额外的保护,以抵御脂肪氧化。现已有研究表明将这些天然酚类化合物添加到原料肉或肉制品中均可以减少脂肪氧化,提高色泽稳定性和总抗氧化能力,从而延长保质期^[11-13]。本文介绍了脂肪氧化的过程,并对多酚抑制肉制品中脂肪氧化的作用机理及国内外研究进展进行了综述,旨在为多酚在肉制品工业的广泛应用提供一定的理论参考。

1 脂肪氧化的过程

脂肪以三酰基甘油酯、磷脂和固醇的形式广泛分布在肉的细胞内和细胞外^[9]。但是,脂肪极不稳定而容易发生氧化。氧气是影响肉类脂肪氧化的主要因素,因为它与不饱和脂肪反应形成脂质过氧化物,这一过程涉及氧气吸收和双键重排。氧化链的扩散通过助氧化剂与不饱和脂肪酸的进一步相互作用而发生,从而导致自由基的形成。最终形成的脂质过氧化物容易发生分解,形成各种化学化合物如醇、醛和酮等^[14]。

脂肪氧化过程主要包括引发、增殖和终止三步自由基链反应。首先,在引发剂的存在下,氢原子从

多不饱和脂肪酸转移,导致脂质烷基自由基(R·)的形成^[15]。形成的烷基自由基与氧的反应比与脂肪的反应快。因此,在增殖阶段形成相应的过氧自由基(ROO·)。之后,过氧自由基与新的不饱和脂肪酸反应形成氢过氧化物,继续自由基链的反应,从而形成更多的脂质过氧化氢和烷基自由基。氢过氧化物随后分解产生挥发性芳香族化合物,使肉制品产生异味和臭味^[16]。最终,自由基-自由基耦合和自由基-自由基歧化终止反应能够打破自由基的增殖步骤,产生三种稳定的非自由基产物。烷基和过氧自由基的相互作用会形成羰基化合物(醛、酮、酮酸)。其中醛的形成与肉色和风味的恶化、蛋白质的稳定性和功能性直接相关^[16]。

研究表明,脂质氧化中产生的醛与动脉粥样硬化、糖尿病、肝硬化、糖尿病肾病、阿尔茨海默症、帕金森和肝癌的发病存在密切联系^[4]。此外,摄入发生脂质氧化的食物会损害血管功能并增加促炎细胞因子和可溶性粘附分子的浓度^[17]。这些脂质氧化的产物激活了炎症反应,会进一步影响肝、肾和肺循环系统^[5]。因此,自由基与清除自由基的抗氧化能力之间的不平衡会对机体造成氧化损伤,进而导致人体易患各种疾病。

2 多酚种类、来源及其抑制脂质氧化的机理

多酚化合物是由一个羟基(-OH)直接与一个芳香烃基团结合的一大类植物次生代谢产物,广泛来源于水果、藻类、植物的花茎叶和果实中^[18]。多酚能够抑制或延缓肉制品氧化,其主要是通过螯合过渡金属离子、清除自由基和羰基化合物来发挥抑制肉制品脂肪氧化作用(图1),它的抗氧化能力主要取决于羟基的数量和与芳香环相连的位置^[10]。

2.1 螯合金属离子

酚类化合物作为脂肪氧化抑制剂的首要功能是与负责引发脂质降解的过渡金属催化剂螯合形成络合物,避免脂质氧化第一步反应的发生。一些多酚化合物具有很强的金属离子螯合能力,其作为氢供体,

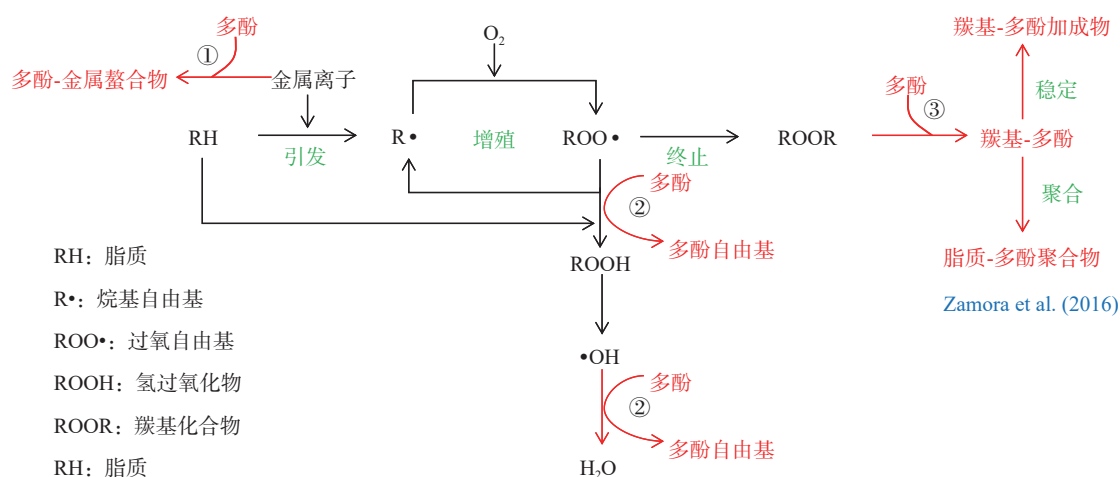


图1 多酚抑制脂肪氧化机理图

Fig.1 Mechanism of polyphenols inhibiting lipid oxidation

可以与金属离子发生络合作用形成稳定性较好的金属络合物^[19]。其中,类黄酮螯合金属离子的能力较强,其分子结构由苯并吡喃和苯基环组成,常见的有儿茶素、槲皮素等。类黄酮结构不同,与金属离子螯合的形式也会不同,因此产生的络合物结构也有所不同^[20]。如图 2 所示,儿茶素结构中没有羰基,其与金属离子的作用取决于本身存在 3',4'邻二羟基;如图 3 所示,槲皮素结构中存在羰基,在 C-4 的酮基与 C-5 的羟基之间优先形成金属离子配合物,形成 1:1 或 1:2 的金属-黄酮络合物^[20]。

2.2 清除自由基

多酚可以通过清除自由基来破坏脂肪氧化第二阶段的自由基链传播反应,从而延缓脂肪氧化过程。多酚可以向自由基提供一个氢原子,同时多酚转化为多酚自由基。与其他脂肪氧化反应产生的自由基不同,多酚自由基不会继续发生自由基链式反应,而是在整个酚环上稳定下来。因此,多酚具有较强的清除烷基、羟基、过氧自由基、超氧自由基等作用^[21]。影响多酚清除自由基能力的因素主要为多酚骨架上游离羟基的数量和位置。研究表明,黄酮类化合物中苯基环可能是清除自由基的决定性因素,如果苯基环结构中存在两个相邻的羟基(邻苯二酚),那么多酚供氢后会形成一个相当稳定的邻半醌自由基。但如果结构中存在三个羟基(邻苯三酚),那么就会形成相对不

稳定的自由基,是弱的自由基清除剂^[10]。除此之外,位置 3(图 2 和图 3)处存在的羟基可以增加抗氧化活性,这可能是苯基环在空间结构上与分子其余部分有一定的扭转角度,大大增加了形成的苯氧基自由基的稳定性^[22]。

2.3 清除羰基化合物

多酚具有捕获羰基的能力,可在一定程度上抑制脂肪氧化第三阶段产生的羰基。影响多酚清除羰基化合物能力的主要因素是游离羟基的形式,包括数量及位置。研究发现,在芳香环的间位存在两个羟基的多酚其清除羰基的能力是最强的,这可能是由于这类多酚的异构体将高电子密度集中在某些碳中,通过将这些碳加到羰基化合物中电子密度低的碳上来进行反应^[10]。因此任何有利于电子离域的取代基都会降低多酚的羰基清除能力。除此之外,羰基化合物中的正电荷也会影响多酚与羰基化合物的反应。活性最强的羰基化合物,如乙二醛或甲基乙二醛,也能与酚类化合物中较少的活性碳发生反应。多酚与羰基化合物反应形成的复合物结构有所不同。如多酚与单羰基反应生成相应的醇,根据反应条件形成的复合物可以进行脱水反应,从而产生更稳定的共轭化合物。多酚与二烯烃的反应比较复杂,因为存在羰基和共轭碳-碳双键两种,因此产生初始复合物后可再进行环化反应,产生更稳定的杂环结构^[23-24]。

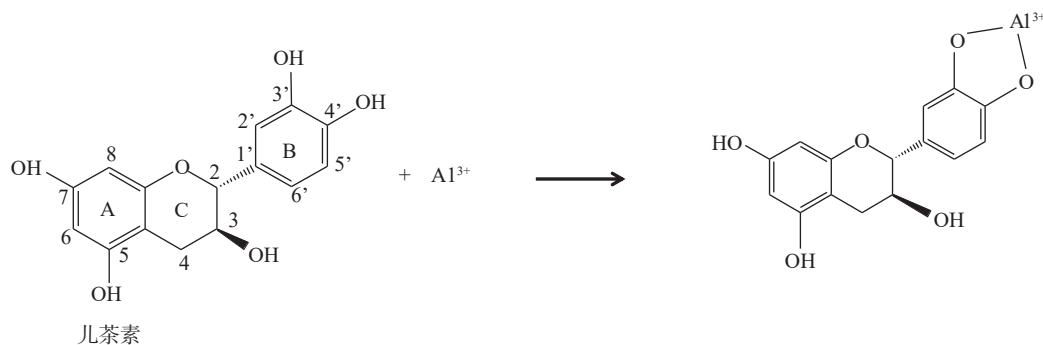


图 2 儿茶素与金属离子的螯合

Fig.2 Chelation of catechin with metal ions

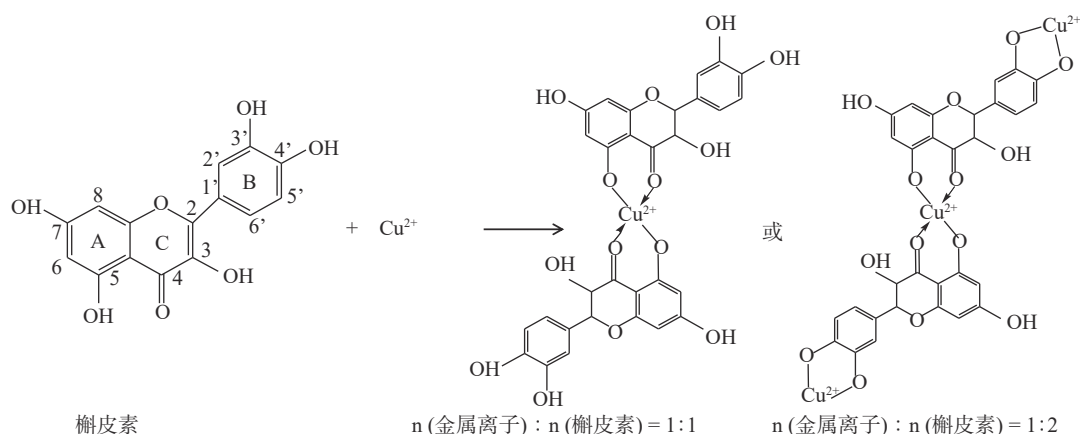


图 3 槲皮素与金属离子的螯合^[18]

Fig.3 Chelation of quercetin with metal ions^[18]

3 多酚抑制肉制品脂肪氧化的研究进展

近年来发现从植物中可以提取出大量多酚,因此越来越多的研究从廉价植物中提取多酚用于抑制肉制品脂肪氧化的研究(表1)。结果表明,植物多酚抗氧化效果明显,未来的研究前景十分广阔。

3.1 水果多酚抑制肉制品氧化的应用

水果中富含多酚,可通过萃取将其提取,之后以粉末的形式加入到肉制品中,能够充分降低氧化应激损害的发生率。

桑葚是一种富含酚类的水果,具有多种生物学和药用特性,例如抗氧化、抗菌、护肝和降血脂。桑葚中含有酚酸、黄酮和花青素等抗氧化剂,其可能提

供氢原子给自由基和/或氧化成苯氧基来阻止脂质氧化。Xiang等^[25]分别通过添加桑葚多酚(0.5或1.0 g/kg)和亚硝酸钠(0.1 g/kg,阳性对照)来制备香肠。结果表明,桑葚多酚对香肠的理化特性几乎没有负面影响。添加1.0 g/kg桑葚多酚的样品显示硫代巴比妥酸(TBARS)活性物质较低(0.60 mg),表明桑葚多酚对香肠中脂质氧化引起的损伤具有保护作用。徐亮^[26]探讨桑葚多酚作为传统抗氧化剂丁基羟基甲苯(BHT)替代物用于肉脯加工的可行性,发现将20 g/kg桑葚多酚添加到肉脯后其抑制肉脯中脂肪氧化效果与0.2 g/kg丁基羟基甲苯(BHT)效果相当。这表明在肉品工业中,桑葚多酚具有作为脂肪抗氧化剂替代物

表1 多酚抑制肉制品脂肪氧化的应用

Table 1 Application of polyphenols in inhibiting lipid oxidation of meat products

多酚来源	添加浓度	肉制品名称	储藏条件	抗氧化效果	参考文献
桑葚	0.5, 1.0 g/kg	香肠	50 °C, 36 h; 室温, 28 d	降低TBARS值, 对理化特性无负面影响	Xiang等 ^[25] , 2019
桑葚	20, 40 g/kg	猪肉脯	室温, 20 d	与空白组相比, TBARS值降低41.59%	徐亮 ^[26] , 2019
蓝莓	2%	猪肉饼	8 °C, 12 d	降低猪肉饼脂肪氧化情况	Muzolf-Panek等 ^[28] , 2015
草莓	350 mg/kg	法兰克福香肠	4 °C, 30 d	降低TBARS值和总挥发性化合物	Armenteros等 ^[30] , 2013
草莓	350 mg/kg	猪肉饼	-80 °C	降低TBARS和己醛值	Ganhao等 ^[31] , 2013
黑加仑	5, 10, 20 g/kg	猪肉饼	4 °C, 9 d	TBARS值相对于对照组74%、90%和92%	Jia等 ^[32] , 2012
黑莓	350 mg/kg	猪肉饼	-80 °C	降低TBARS值和脂质衍生的挥发性化合物含量	Ganhao等 ^[31] , 2013
紫菜和裙带菜	5.6%	低盐肉糜	70 °C, 30 min	增加了n-3多不饱和脂肪酸的含量和降低了n-6/n-3多不饱和脂肪酸的含量	López-lópez等 ^[38] , 2009
褐藻	300 mg/kg	鳕鱼肉	1~3 °C, 8 d	与100 mg/kg的没食子酸丙酯抑制氧化能力相当	Wang等 ^[39] , 2010
海带	5, 10, 20 g/kg	猪肉糜	4 °C, 9 d	TBARS值分别降低了68.5%、81.1%和83.6%	孟彤 ^[40] , 2015
茶叶	300 ppm	发酵香肠	18 °C, 15 d	降低TBARS值能力大于300 ppm BHT	Bozkurt等 ^[45] , 2006
茶叶	74.8 g/kg	中式培根	4 °C, 3 d; 18 °C每天升温1.5 °C, 10 d	降低培根过氧化物、TBARS和酸价	申雷 ^[46] , 2011
茶叶	20%	猪肉香肠	4±1 °C, 20 d	降低TBARS值, 延长货架期	Siripatrawan等 ^[47] , 2011
鼠尾草	0.05, 0.075, 0.1 μL/g	猪肉香肠	3±1 °C, 8 d	降低TBARS值, 对感官特性几乎无负面影响	Šojic等 ^[49] , 2018
鼠尾草	0.05%, 0.1%, 0.15%	猪肉香肠	4 °C, 21 d	降低过氧化物、TBARS值, 三个浓度的鼠尾草提取物抑制氧化能力无显著差异	章林 ^[50] , 2013
皮坦加叶	250, 500, 1000 mg/kg	猪肉饼	气调包装 2±1 °C, 18 d	脂质氧化抑制率在93%~95%	Lorenzo等 ^[13] , 2018
马齿苋	0.25%, 0.50%, 1.0%	猪肉	4 °C, 9 d	降低TBARS值, 将保质期延长2 d	Fan等 ^[51] , 2019
迷迭香	1500, 2500 ppm	猪肉香肠	-30 °C速冻后 -20 °C冷冻	比BHA/BHT更有效地防止原始冷冻香肠中的TBARS值升高	Sebranek等 ^[52] , 2005
迷迭香	260 mg/kg	猪肉香肠	4 °C, 9 d	显示出与SO ₂ 相当的脂质稳定性, 且提升感官特性	Mathenjwa等 ^[53] , 2012
迷迭香	25, 100, 250 ppm	猪肉匀浆	37 °C, 80或200 min	呈反向剂量依赖性降低TBARS值	Zhou等 ^[54] , 2019
栗子叶	1 g/kg	干腌香肠	7 °C, 2 d; 12 °C, 48 d	减少了脂质氧化中的总挥发性化合物, 效果优于200 mg/kg BHT	Lorenzo等 ^[55] , 2013
栗子叶	2000 mg/kg	猪肉香肠	20 °C, 2 d; 12 °C, 49 d	降低TBARS值和己醛含量	Munekata等 ^[56] , 2017
石榴皮	0.5%, 1%	牛肉丸	4±1 °C, 8 d	抑制过氧化物值, 将保质期延长至8 d	Turgut等 ^[57] , 2016
石榴皮	17.25 mg/kg	法兰克福香肠	4 °C, 60 d	降低过氧化物值	Firuzi等 ^[58] , 2019
花生皮	1000 mg/kg	绵羊肉饼	气调包装 2±1 °C, 20 d	降低TBARS值, 延缓红度值降低	Munekata等 ^[60] , 2016
花生皮	70 mg/kg	鸡肉饼	1±1 °C, 15 d	降低TBARS值	Munekata等 ^[61] , 2015
槐花	0.2%	中式香肠	10 °C, 30 d	抑制酸价和TBARS值升高	Tang等 ^[62] , 2019
槐花	0.2%	中式香肠	10 °C, 30 d	提高自由基清除活性, 降低酸价和TBARS值	罗静 ^[63] , 2019

的潜力。

蓝莓含有多种酚类化合物(黄烷醇、单宁和花青素),其中最主要的多酚之一是绿原酸,绿原酸是乳化型香肠的有效抗氧化剂^[27]。Muzolf-Panek 等^[28]发现在猪肉中添加蓝莓提取物可在储存期间提高产品稳定性,而通过掺入纤维来减少替代脂肪并不能有效提高氧化稳定性。

草莓果肉中包含四十多种酚类化合物,主要呈糖基化形式,包括槲皮素、山奈酚、花青素、鞣花酸、对香豆酸和鞣花单宁的衍生物等^[29]。Armenteros 等^[30]通过 TBARS 值和脂质衍生的挥发性化合物评估脂质在储存期间草莓提取物抑制烟熏腊肠的氧化情况,结果显示含草莓提取物的样品在储存后呈现出最低的 TBARS 值。Ganhão 等^[31]研究了草莓提取物对猪肉饼在烹饪和冷藏时脂质氧化的影响。在这项研究中,与对照组相比,用草莓提取物制成的肉饼的 TBARS 和己醛含量较低。研究推测草莓因含有丰富的槲皮素,其结构中存在羰基可以螯合金属离子,进而形成金属-黄酮络合物,因此破坏脂质氧化第一步所必需的引发剂。

黑加仑具有较高的多酚含量,因此具有良好的抗氧化活性,是肉类加工过程中有较好应用前景的天然抗氧化剂。Jia 等^[32]研究了添加 5、10 和 20 g/kg 黑加仑提取物的冷藏猪肉饼中脂质和蛋白质的氧化情况。研究表明,4℃ 冷藏 9 d 后含有黑加仑提取物的猪肉饼显示出较低的 TBARS 值,且呈剂量依赖性,与对照组相比,分别降低了 74%、90% 和 92%。研究人员推测黑加仑提取物的添加主要通过阻断自由基链反应来抑制脂质的氧化。

黑莓中发现了许多能够增强抗氧化活性的酚类化合物,例如花青素、黄酮醇、绿原酸和原花青素等。有研究对黑莓中的酚类化合物进行了鉴定,结果显示黑莓中包括 8 种花色苷,15 种黄酮醇,3 种羟基肉桂酸,6 种鞣花酸衍生物和 2 种黄酮^[33]。其中某些酚类化合物如花青素-3-葡萄糖苷具有螯合金属的活性,可以阻碍熟食肉中非血红素铁的促氧化作用,从而延缓氧化的发生。Ganhão 等^[31]研究发现含黑莓提取物的猪肉饼在蒸煮和冷藏过程中其 TBARS 值较未添加的对照组明显降低。同样,含黑莓提取物的猪肉饼中的己醛含量也比对照组低。因此,结果表明,通过在原料肉和加工肉中加入黑莓提取物,可以有效地减少脂肪的氧化反应。

浆果挂果期短,且由于其水分含量高、皮薄、不易储藏,因此货架期极短。目前主要以水果、果汁、果酒或果酱的形式流通于市面,附加值较低^[26]。浆果多酚提取技术日益成熟,且其本身绿色安全并具有良好的抗脂肪氧化作用,因此提取浆果多酚应用于肉制品可以减少氧化并提高肉制品的安全性。然而,浆果本身和提取的成本限制了其应用于工业生产,因此未来应致力于降低提取成本。

3.2 海藻多酚抑制肉制品氧化的应用

在海洋生物中,海藻是天然抗氧化剂和抗菌剂的最丰富来源之一^[34]。López 等^[35]报道了从海藻中发现 14 种多酚的存在,分别是没食子酸、儿茶素、表儿茶素、芦丁、对香豆酸、杨梅素、槲皮素和原儿茶酸、香草酸、咖啡酸、阿魏酸、绿原酸、丁香酸和龙胆酸。Ganesan 等^[36]研究发现海藻中的多酚化合物可能作为还原剂,与自由基反应并提供电子以产生更稳定的产物,从而发挥抗氧化活性。同时 Athukorala 等^[37]认为海藻提取物能够清除过氧化氢的原因是其酚类化合物具有中和电子的作用。

有研究从紫菜和裙带菜中提取出了酚酸(原儿茶酸、对羟基苯甲酸、2,3-二羟基苯甲酸、绿原酸、咖啡酸、对香豆酸、水杨酸),肉桂酸和羟基苯甲醛(对羟基苯甲醛、3,4-二羟基苯甲醛)并且食用海藻,裙带菜和紫菜可为低盐肉糜模型系统提供可溶多酚化合物,从而提高系统的抗氧化能力^[38]。

海藻中含有丰富的邻苯二酚和邻苯三酚,可以清除自由基、超氧化物自由基、过氧自由基、螯合亚铁离子。Wang 等^[39]研究了低聚邻苯二酚在鱼类和鱼类产品中作为新型天然抗氧化剂的潜力,结果表明 300 mg/kg 低聚邻苯二酚的抗氧化能力与 100 mg/kg 没食子酸丙酯相当,这主要是由于邻苯二酚供氢后会形成一个相当稳定的邻苯醌自由基,其能够有效地清除自由基。

海带中含有的活性物质包括萜类、褐藻多酚等。孟彤^[40]将 5、10、15 g/kg 的海带多酚提取物添加到乳化肠产品中并在 4℃ 冷藏 4 周,结果表明,海带多酚提取物的添加对乳化肠的品质无不良影响,并且总体可接受度较高,同时,海带多酚显著延缓乳化肠的 TBARS 的升高,这表明乳化肠中的脂质氧化得到了有效的抑制。

海藻是天然抗氧化剂的丰富来源。添加这些天然提取物不仅可以改善肉制品的品质,还可以提高其安全性。同时,海藻还可能提供其它众多健康益处。尽管有大量关于海藻提取物抗氧化特性的文献,但关于其在食品中的实际使用研究仍然较少,消费者对海藻的健康益处的了解也尚且不足。因此,将海藻多酚大规模应用于抗肉制品脂肪氧化仍需要较为深入的研究^[35]。

3.3 植物花、茎、叶、果皮多酚抑制肉制品氧化的应用

一些植物的花、茎、叶、果皮中含有大量多酚,具有出色的抗氧化活性,赋予其在食品系统中的重要应用价值。

茶叶是最常见的富含多酚的植物叶子,可提取出大量的黄烷醇(没食子儿茶素、儿茶素没食子酸酯、表儿茶素等)、黄酮醇(槲皮素、山奈酚等)、和酚酸(羟基苯甲酸和羟基肉桂酸)。茶叶多酚主要从三个方面发挥抑制脂肪氧化作用,一方面是茶叶多酚具

有较强的铁结合活性,可破坏脂肪氧化反应第一步所需的引发剂^[41];二是直接清除自由基,茶叶多酚中的酚羟基作为氢供体与脂肪氧化产生的自由基结合产生酚氧自由基,从而终止自由基链式反应^[42];另一方面是茶叶多酚自身可以被氧化成含有邻苯二酚的自由基中间体,抑制自由基对脂肪的进一步作用^[43]。Lin等^[44]用BHT(0.02%)、绿茶提取物(0.02%~0.05%)、亚硝酸盐(0.003%~0.015%)制备意大利香肠,储存76 d后,与对照相比,所有抗氧化剂处理均能延缓脂质氧化,其中0.05%的绿茶提取物和0.009%的亚硝酸盐的效果最佳。Bozkurt^[45]也观察到绿茶提取物在一种传统的土耳其干发酵香肠中产生的积极效果。与未添加抗氧化剂的样品相比,绿茶提取物延缓了脂质氧化,其抑制脂质氧化能力甚至比BHT还高。绿茶提取物的用途不仅局限于作为功能成分来保护肉类和肉类产品,其还可以添加在薄膜中制成活性包装材料。申雷^[46]采用改性茶多酚对中式培根进行涂膜抗氧化处理,研究其发酵成熟过程中脂质的氧化情况。结果表明,经改性茶多酚壳聚糖联合处理的中式培根在成熟结束时内层肌肉过氧化值、硫代巴比妥酸、酸价值均有所下降,这说明改性茶多酚能有效抑制中式培根脂质氧化。Siripatrawan等^[47]评估了用绿茶提取物(20%)制备的壳聚糖膜对商业猪肉香肠保质期的影响。发现与用普通膜包裹的猪肉香肠相比,用含绿茶提取物膜包裹的样品其脂质氧化和微生物的生长被大大抑制,从而延长了猪肉香肠的保质期,研究人员推测绿茶多酚的抗氧化活性可归因于多种机制,包括防止自由基链引发,过渡金属离子催化剂的结合以及与自由基的相互作用。

鼠尾草是一种集食用、药用和保健于一体的草本植物。其主要的抗氧化活性酚类物质为鼠尾草酚、鼠尾草酸、迷迭香酸和萜烯等。据报道,鼠尾草酚和鼠尾草酸是一种具有很强的过氧自由基和羟自由基清除剂,迷迭香酸是一种良好的超氧阴离子清除剂。这些酚类物质可以通过提供氢原子给过氧自由基,而使过氧自由基稳定,其本身会被氧化成一种稳定的苯环类自由基,从而能够抑制自由基传递,达到抗脂肪氧化的效果^[48]。Šojić等^[49]将从鼠尾草中提取的鼠尾草精油和鼠尾草提取物添加到猪肉糜中,制备分别含0.05、0.075和0.1 μL/g鼠尾草精油和鼠尾草提取物的猪肉香肠。结果表明,鼠尾草精油和鼠尾草提取物均具有良好的抗氧化能力,在浓度为0.1 μL/g时,对脂质氧化的抑制作用最强。章林^[50]研究发现,添加鼠尾草到中式香肠中会显著降低香肠的过氧化值和TBARS值,这可能主要是鼠尾草中的酚酸抑制了脂肪氧化的三步链式反应,因此添加鼠尾草可以抑制香肠的脂肪的氧化。

皮坦加叶因其具有对人体健康有益的生物作用的化合物而闻名,例如预防高血压、黄热病、风湿病、胃病、消化系统疾病等,这些有益特性中的大多

数归因于酚类化合物的含量较高,包括黄酮类、单宁以及萜烯和萜烯等。此外,由于具有这些活性,研究将皮坦加叶提取物作为肉中的抗氧化剂添加剂。Lorenzo等^[13]评估了不同浓度的皮坦加叶提取物(250、500、1000 mg/kg)对猪肉汉堡在2±1 °C的气调包装中(80% O₂ + 20% CO₂)贮藏期间的脂质氧化的影响。结果表明在储存期结束时,三种浓度的皮坦加叶提取物显示出相似的脂质氧化抑制水平,与对照组汉堡相比,抑制率在93%~95%之间。

马齿苋是一种可食用植物,同时还含有一些抗氧化剂成分,例如香豆素、酚酸和黄酮类化合物。有研究评估了不同水平(0.25%、0.50%、1.0%)的马齿苋提取物对冷藏猪肉储存质量和保质期的影响。结果表明,马齿苋提取物处理可显著延迟脂质氧化,降低TBARS值。与对照组相比,马齿苋提取物将猪肉保质期延长了2 d^[51]。马齿苋提取物的抗氧化作用可能归因于其所含的多酚物质如黄酮类化合物与金属离子所产生的螯合作用。

迷迭香的茎叶中可提取具有优良抗氧化特性的多酚,现已有部分研究将其用于肉制品的保藏,延长其货架期。Mathenjwa等^[52]分别将不同浓度的迷迭香提取物添加至香肠中,结果表明低、高浓度迷迭香提取物均能降低产品的TBARS值,并保持产品良好的色泽,并且迷迭香提取物显示出优于壳聚糖的脂质稳定性。另外,有研究比较了迷迭香、绿茶和马黛的植物提取物对猪肉糜脂肪氧化的防护作用。TBARS值结果表明,猪肉糜的脂质氧化均得到了充分的抑制,其中迷迭香抑制效果最佳且具有反向的剂量依赖性反应,即在最低浓度下发现了最佳的氧化抑制效果,这一现象可能是由于迷迭香提取物具有较强的螯合铁离子的作用^[53]。

在板栗叶中发现的主要抗氧化剂化合物是酚类化合物,其中酚酸(松香酸和没食子酸)、类黄酮(芦丁、槲皮素和芹菜素)和单宁含量最高,其具有较强的清除自由基、氢供体、单线态氧猝灭或金属离子螯合能力。Lorenzo等^[54]的研究表明,在45 d的发酵香肠成熟期,添加1 g/kg的板栗叶提取物后,香肠TBARS水平显著下降,且添加了提取物的香肠中未检测到脂质氧化产物-己醛。Munekata等^[55]也观察到2 g/kg的板栗叶提取物对延缓西班牙香肠氧化具有积极的作用。

石榴皮含有大量的酚类物质,包括类黄酮(花青素、儿茶素和其他复杂的类黄酮)和可水解的单宁酸。类黄酮螯合金属离子的能力较强,单宁酸也具有一定清除自由基和捕获羰基的能力,因此可以有效阻断脂肪氧化的三步反应^[56]。Turgut等^[57]研究发现,将0.5%和1%石榴皮提取物添加至牛肉丸中可延缓其脂质氧化并提升感官评分,到贮藏期结束时,对于石榴皮提取物处理过的样品,其TBARS值、过氧化物质值均低于阳性对照(BHT为0.01%)和阴性对照

(不添加任何抗氧化剂),并且其货架期延长了 8 d 左右。Firuzi 等^[58]研究了 10 mg/100 g 的石榴皮提取物法兰克福香肠氧化的影响。结果显示,在 4 °C 贮藏期间,加入石榴皮提取物可使香肠的 TBARS 值显著降低。

花生皮中的多酚主要由原花色素,酚酸和类黄酮等组成^[59]。Munekata 等^[60]观察到,200 ppm 花生皮提取物抑制了气调包装(80% O₂-20% CO₂)中生绵羊肉饼的脂质氧化,并减少了感官属性的变化,但是花生皮提取物不会影响游离脂肪酸的含量。另一项关于花生皮提取物用于煮熟的鸡肉饼的研究中,3% 花生皮提取物抑制了鸡肉饼的脂质氧化,并在冷藏存储 15 d 期间防止了颜色的劣变^[61]。

槐花中含有大量黄酮类化合物,其中所含的酚羟基能够阻断脂肪自动氧化的自由基链式反应,达到抗氧化的作用。大量研究证实了槐花的抗氧化和自由基清除活性。有研究调查了添加天然来源的槐花(0.2%)对中国香肠品质的影响,结果表明,添加槐花的中国香肠显示出较低的 TBARS 值和酸价^[62]。同时,罗静^[63]也发现槐花可作为抗氧化剂和益生元成分加入中式香肠或其他发酵肉制品以提高抗氧化能力。

植物花、茎、叶、果皮中可提取多种多酚,这些提取物可延缓抑制脂质氧化和肉类色素的降解,因此有助于延缓不良气味的产生并稳定肉制品的颜色。这些提取物的应用改善了肉制品的整体感官品质和营养价值,从而延长了肉制品的保质期。尽管这些提取物来源于安全的植物,但是由于经过提取和加工,其性质可能发生改变,因此其在肉制品中的毒理作用应当被重视。

4 结论与展望

多酚是合成抗氧化剂的良好替代品,其作为天然抗氧化剂已在不同类型的肉制品中得到了广泛的研究。研究表明,这些从植物中提取的多酚可抑制肉制品脂质氧化,有助于延缓不良气味的产生并改善了肉类产品的整体感官品质,因此延长了它们的保质期。然而,尽管从植物中提取多酚的方法已经越来越成熟,但工艺成本仍是影响其工业化生产的重要因素,仍需进一步优化提取工艺,提高多酚得率,降低提取成本。其次,尽管这些多酚通常是从绿色安全的植物中提取的,但是由于提取或加工条件可能会改变其理化性质,因此还需要进一步研究以确定其在肉类产品中的安全限量和毒理作用,以确保其作为安全可食用的食品添加剂进而应用于肉品工业中。

参考文献

- [1] ZHANG W, XIAO S, SAMARAWEEERA H, et al. Improving functional value of meat products[J]. *Meat Science*, 2010, 86(1): 15-31.
- [2] DOMÍNGUEZ R, GÓMEZ M, FONSECA S, et al. Influence of thermal treatment on formation of volatile compounds, cooking

loss and lipid oxidation in foal meat[J]. *LWT - Food Science & Technology*, 2014, 58(2): 439-445.

[3] SOLADOYE O P, JUÁREZ M L, AALHUS J L, et al. Protein oxidation in processed meat: Mechanisms and potential implications on human health[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2015, 14(2): 106-122.

[4] HU W, FENG Z, EVELEIGH J, et al. The major lipid peroxidation product, trans-4-hydroxy-2-nonenal, preferentially forms DNA adducts at codon 249 of human, p53 gene, a unique mutational hot-spot in hepatocellular carcinoma[J]. *Carcinogenesis*, 2002, 23(11): 1781-1789.

[5] NATHAN C. Points of control in inflammation[J]. *Nature*, 2002, 420(6917): 846-852.

[6] 章林, 黄明, 周光宏. 天然抗氧化剂在肉制品中的应用研究进展[J]. *食品科学*, 2012, 33: 305-309. [ZHANG L, HUANG M, ZHOU G H. Research progress in applications of natural antioxidants in meat products[J]. *Food Science*, 2012, 33: 305-309.]

[7] SHAH M A, BOSCO S J D, MIR S A. Plant extracts as natural antioxidants in meat and meat products[J]. *Meat Science*, 2014, 98(1): 21-33.

[8] JAKOBEC L. Interactions of polyphenols with carbohydrates, lipids and proteins[J]. *Food Chemistry*, 2015, 175: 556-567.

[9] FALOWO A B, FAYEMI P O, MUCHENJE V. Natural antioxidants against lipid-protein oxidative deterioration in meat and meat products: A review[J]. *Food Research International*, 2014, 64: 171-181.

[10] ZAMORA R, HIDALGO F J. The triple defensive barrier of phenolic compounds against the lipid oxidation-induced damage in food products[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2016, 54: 165-174.

[11] TURGUT S S, İŞİKÇİ F, SOYER A. Antioxidant activity of pomegranate peel extract on lipid and protein oxidation in beef meatballs during frozen storage[J]. *Meat Science*, 2017, 129: 111-119.

[12] WANG Y L, 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 & Technology*, 2015, 60: 199-206.

[13] LORENZO J M, VARGAS F C, STROZZI I, et al. Influence of pitanga leaf extracts on lipid and protein oxidation of pork burger during shelf-life[J]. *Food Research International*, 2018, 114: 47-54.

[14] 王乐田, 贾娜. 植物多酚对肉制品脂肪氧化和蛋白氧化的抑制机理及应用[J]. *中国食品学报*, 2016, 16(8): 205-210.

[WANG L T, JIA N. Mechanisms and application of plant polyphenol in inhibiting lipid and protein oxidation in meat products[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2016, 16(8): 205-210.]

[15] SENANAYAKE N, P J S. Green tea extract: Chemistry, antioxidant properties and food applications-a review[J]. *Journal of Functional Foods*, 2013, 5(4): 1529-1541.

[16] LORENZO J M, PATEIROA M, DOMÍNGUEZ R, et al. Berries extracts as natural antioxidants in meat products: A

- review[J]. *Food Research International*, 2018, 106: 1095–1104.
- [17] KANNER J. Dietary advanced lipid oxidation endproducts are risk factors to human health[J]. 2007, 51(9): 1094–1101.
- [18] 李文慧, 刘飞, 李应彪, 等. 植物多酚对肉制品蛋白氧化的抑制机理及其延长货架期的应用[J]. *食品科学*, 2019, 40(21): 266–272. [LI W H, LIU F, LI Y B, et al. Inhibitory mechanism of plant polyphenols on protein oxidation and their application for shelf-life extension of meat products: A literature review[J]. *Food Science*, 2019, 40(21): 266–272.]
- [19] MIRA L, TEREZA F M, SANTOS M, et al. Interactions of flavonoids with iron and copper ions: A mechanism for their antioxidant activity[J]. *Free Radical Research Communications*, 2002, 36(11): 1199–1208.
- [20] SELVARAJ S, KRISHNASWAMY S, DEVASHYA V, et al. Flavonoid-metal ion complexes: A novel class of therapeutic agents[J]. *Medicinal Research Reviews*, 2014, 34(4): 677–702.
- [21] MAQSOOD S, BENJAKUL S, ABUSHELAIBI A, et al. Phenolic compounds and plant phenolic extracts as natural antioxidants in prevention of lipid oxidation in seafood: A detailed review[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2014, 13(6): 1125–1140.
- [22] VAN ACKER S A B E, DE GROOT M J, VAN DEN BERG D J, et al. A quantum chemical explanation of the antioxidant activity of flavonoids[J]. *Chemical Research in Toxicology*, 1996, 9(8): 1305–1312.
- [23] CHENG K, WONG C, CHAO J, et al. Inhibition of mutagenic PhIP formation by epigallocatechin gallate via scavenging of phenylacetaldehyde[J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2009, 53(6): 716–725.
- [24] ZHENG Z P, YAN Y, XIA J, et al. A phenylacetaldehyde-flavonoid adduct, 8-C-(E-phenylethenyl)-norartocarpetin, exhibits intrinsic apoptosis and MAPK pathways-related anticancer potential on HepG2, SMMC-7721 and QGY-7703[J]. *Food Chemistry*, 2016, 197: 1085–1092.
- [25] XIANG R, CHENG J R, ZHU M J, et al. Effect of mulberry (*Morus alba*) polyphenols as antioxidant on physiochemical properties, oxidation and bio-safety in Cantonese sausages[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2019, 116: 108504.
- [26] 徐亮. 桑葚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 L. Studies on quality improvement and mechanism of mulberry polyphenol on dried minced pork slices[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.]
- [27] HUR S J, KIM D H, CHUN S C, et al. Antioxidative changes of blueberry leaf extracts in emulsion-type sausage during *in vitro* digestion[J]. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 2013, 33(6): 689–695.
- [28] MUZOLF-PANEK M, WAŚKIEWICZ A, KOWALSKI R, et al. The effect of blueberries on the oxidative stability of pork meatloaf during chilled storage[J]. *Journal of Food Processing & Preservation*, 2016, 40(5): 899–909.
- [29] AABY K, MAZUR S, NES A, et al. Phenolic compounds in strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.) fruits: Composition in 27 cultivars and changes during ripening[J]. *Food Chemistry*, 2012, 132(1): 86–97.
- [30] ARMENTEROS M, MORCUENDE D, VENTANAS S, et al. Application of natural antioxidants from strawberry tree (*Arbutus unedo* L.) and dog rose (*Rosa canina* L.) to frankfurters subjected to refrigerated storage[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2013, 12(11): 1972–1981.
- [31] GANHÃO R, ESTEVEZ 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(11): 1982–1992.
- [32] JIA N, KONG B H, LIU Q, et al. Antioxidant activity of black currant (*Ribes nigrum* L.) extract and its inhibitory effect on lipid and protein oxidation of pork patties during chilled storage[J]. *Meat Science*, 2012, 91(4): 533–539.
- [33] OSZMIANSKI J, NOWICKA P, TELESZKO M, et al. Analysis of phenolic compounds and antioxidant activity in wild blackberry fruits[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2015, 16(12): 14540–14553.
- [34] REZAYIAN M, NIKNAM V, EBRAHIMZADEH H. Oxidative damage and antioxidative system in algae[J]. *Toxicology Reports*, 2019, 6: 1309–1313.
- [35] LOPEZ A, RICO M, RIVERO A, et al. The effects of solvents on the phenolic contents and antioxidant activity of *Stypocaulon scoparium* algae extracts[J]. *Food Chemistry*, 2011, 125(3): 1104–1109.
- [36] GANESAN K, KUMAR K S, RAO P V S. Comparative assessment of antioxidant activity in three edible species of green seaweed, *Enteromorpha* from Okha, Northwest coast of India[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2011, 12(1): 73–78.
- [37] ATHUKORALA Y, LEE K W, SONG C B, et al. Potential antioxidant activity of marine red alga *Grateloupia filicina* extracts[J]. *Journal of Food Lipids*, 2003, 10: 251–265.
- [38] LÓPEZ-LÓPEZ I, BASTIDA S, RUIZ-CAPILLAS C, et al. Composition and antioxidant capacity of low-salt meat emulsion model systems containing edible seaweeds[J]. *Meat Science*, 2009, 83: 492–498.
- [39] WANG T, JONSDOTTIR R, KRISTINSSON H G, et al. Inhibition of haemoglobin-mediated lipid oxidation in washed cod muscle and cod protein isolates by *Fucus vesiculosus* extract and fractions[J]. *Food Chemistry*, 2010, 123(2): 321–330.
- [40] 孟彤. 海带多酚提取物对猪肉乳化肠品质及氧化稳定性的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015. [MENG T. Effect of saccharina japonica aresch phenolic extracts on the edible quality and oxidative stability of pork sausage[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015.]
- [41] KHOKHAR S, APENTEN R K O. Iron binding characteristics of phenolic compounds: Some tentative structure-activity relations[J]. *Food Chemistry*, 2003, 81(1): 133–140.
- [42] GUO Q, ZHAO B, LI M, et al. Studies on protective mechanisms of four components of green tea polyphenols against lipid peroxidation in synaptosomes[J]. *Biochim Biophys Acta*, 1996,

- 1304(3): 210–222.
- [43] LORENZO J M. Phenolic compounds of green tea: Health benefits and technological application in food[J]. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 2016, 6(8): 709–719.
- [44] LIN Y, HUANG M, ZHOU G, et al. Prooxidant effects of the combination of green tea extract and sodium nitrite for accelerating lipolysis and lipid oxidation in pepperoni during storage[J]. *Journal of Food Science*, 2011, 76(5): 694–700.
- [45] BOZKURT H. Utilization of natural antioxidants: Green tea extract and *Thymbra spicata* oil in Turkish dry-fermented sausage [J]. *Meat Science*, 2006, 73(3): 442–450.
- [46] 申雷. 茶多酚分子修饰改性及其对中式培根抗氧化作用的研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2011. [SHEN L. Study on molecule modified of tea polyphenol and its antioxidative effect on Chinese bacon[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011.]
- [47] SIRIPATRAWAN U, NOIPHA S. Active film from chitosan incorporating green tea extract for shelf life extension of pork sausages[J]. *Food Hydrocolloids*, 2012, 27(1): 102–108.
- [48] LETICIA M, PAOLA D, JORDI O, et al. Effects of sage distillation by-product (*Salvia lavandulifolia* Vahl.) dietary supplementation in light lambs fed on concentrates on meat shelf life and fatty acid composition[J]. *Meat Science*, 2017, 134: 44–53.
- [49] ŠOJIĆ B, PAVLIĆ B, ZEKOVIĆ Z, et al. The effect of essential oil and extract from sage (*Salvia officinalis* L.) herbal dust (food industry by-product) on the oxidative and microbiological stability of fresh pork sausages[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2018, 89: 749–755.
- [50] 章林. 鼠尾草对中式香肠抗氧化和食用品质的影响 [D]. 南京: 南京农业大学, 2013. [ZHANG L. Effects of sage (*Salvia officinalis*) on the oxidative stability and edible quality of Chinese-style sausage[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013.]
- [51] FAN X J, LIU S Z, LI H H, et al. Effects of *Portulaca oleracea* L. extract on lipid oxidation and color of pork meat during refrigerated storage[J]. *Meat Science*, 2019, 147: 82–90.
- [52] MATHENJWA S A, HUGO C J, BOTHMA C, et al. Effect of alternative preservatives on the microbial quality, lipid stability and sensory evaluation of boerewors[J]. *Meat Science*, 2012, 91(2): 165–172.
- [53] ZHOU F, JONGBERG S, ZHAO M, et al. Antioxidant efficiency and mechanisms of green tea, rosemary or mate extracts in porcine Longissimus dorsi subjected to iron-induced oxidative stress[J]. *Food Chemistry*, 2019, 298: 125030.
- [54] LORENZO J M, GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ R M, SÁNCHEZ M, et al. Effects of natural (grape seed and chestnut extract) and synthetic antioxidants (butylatedhydroxytoluene, BHT) on the physical, chemical, microbiological and sensory characteristics of dry cured sausage “chorizo”[J]. *Food Research International*, 2013, 54: 611–620.
- [55] MUNEKATA P E S, DOMINGUEZ R, FRANCO D, et al. Effect of natural antioxidants in Spanish salchichon elaborated with encapsulated n-3 long chain fatty acids in konjac glucomannan matrix[J]. *Meat Science*, 2017, 124: 54–60.
- [56] SMAOUI S, HLIMA H B, MTIBAA A C, et al. Pomegranate peel as phenolic compounds source: Advanced analytical strategies and practical use in meat products[J]. *Meat Science*, 2019, 158: 107914.
- [57] TURGUT S S, SOYER A, İŞIKÇI F. Effect of pomegranate peel extract on lipid and protein oxidation in beef meatballs during refrigerated storage[J]. *Meat Science*, 2016, 116: 126–132.
- [58] FIRUZI M R, NIAKOUSARI M, ESKANDARI M H, et al. Incorporation of pomegranate juice concentrate and pomegranate rind powder extract to improve the oxidative stability of frankfurter during refrigerated storage[J]. *LWT*, 2019, 102: 237–245.
- [59] LORENZO J M, MUNEKATA P E S, SANT’ANA A S, et al. Main characteristics of peanut skin and its role for the preservation of meat products[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2018, 77: 1–10.
- [60] MUNEKATA P E S, FERNANDES R D P P, DE MELO M P, et al. Influence of peanut skin extract on shelf-life of sheep patties[J]. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 2016, 6(7): 586–596.
- [61] 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(3): 442–446.
- [62] TANG R Y, LUO J, WANG W, et al. Rutin's natural source flos sophorae as potential antioxidant and improver of fungal community in Chinese sausages[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2019, 101: 435–443.
- [63] 罗静. 槐米与香辛料对中式香肠发酵和品质的影响 [D]. 成都: 成都大学, 2019. [LUO J. Flos sophorae and spices on fermentation and quality of Chinese sausage[D]. Chengdu: Chengdu University, 2019.]