

# 植物资源在改善肉类预制菜肴品质中的应用前景

陈佩钰<sup>1,2</sup>, 刘学铭<sup>1</sup>, 唐道邦<sup>1</sup>, 王旭莘<sup>1</sup>, 杨怀谷<sup>1</sup>, 林耀盛<sup>1</sup>, 程镜蓉<sup>1\*</sup>, 朱明军<sup>2\*</sup>, 阮栋<sup>3</sup>

(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. 华南理工大学生物科学与工程学院, 广东广州 510006)

(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:** 肉制品是人类重要的蛋白质来源。肉类预制菜肴的加工和贮藏过程中容易发生过氧化反应与微生物污染, 造成营养流失、色泽衰退、风味下降。传统肉制品抗氧化剂对人体健康带来的安全隐患问题已引起人们重视, 天然植物资源在调控肉制品营养与品质中的应用备受关注。天然植物中富含多酚、多糖、有机酸、萜类化合物等活性成分, 对于肉制品的色泽、氧化、风味及有害物质生成等均具有良好调控作用。该研究围绕着肉类预制菜肴关键的品质变化、植物中典型的活性物质、天然活性物质在肉类预制菜肴中的应用现状这三个方面进行综述, 并对当前植物资源在改善预制菜肴品质中存在的问题和未来发展方向进行分析, 为肉类预制菜行业高质量发展提供参考。

**关键词:** 肉类预制菜肴; 天然抗氧化剂; 毒害物质; 应用

文章编号: 1673-9078(2023)02-88-98

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.2.0631

## Application Prospects of Plant Resources in Improving the Quality of Pre-prepared Meat Dishes

CHEN Peiyu<sup>1,2</sup>, LIU Xueming<sup>1</sup>, TANG Daobang<sup>1</sup>, WANG Xuping<sup>1</sup>, YANG Huaigu<sup>1</sup>, LIN Yaosheng<sup>1</sup>, CHENG Jingrong<sup>1\*</sup>, ZHU Mingjun<sup>2\*</sup>, RUAN Dong<sup>3</sup>

(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. College of Biology and Biological Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, 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:** Meat products are an important source of protein for humans. Pre-prepared meat dishes are prone to peroxidation and microbial contamination during processing and storage, resulting in the loss of nutrients, color, and flavor. Therefore, the potential safety hazards of antioxidants in conventional meat products to human health have attracted people's attention, and the application of natural plant resources to regulate the nutritional value and quality of meat products has been emphasized. Plants are rich in polyphenols, polysaccharides, organic acids,

引文格式:

陈佩钰, 刘学铭, 唐道邦, 等. 植物资源在改善肉类预制菜肴品质中的应用前景[J]. 现代食品科技, 2023, 39(2): 88-98

CHEN Peiyu, LIU Xueming, TANG Daobang, et al. Application prospects of plant resources in improving the quality of pre-prepared meat dishes [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(2): 88-98

收稿日期: 2022-05-18

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: 陈佩钰(1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品生物学, E-mail: pychen99@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; 共同通讯作者: 朱明军(1969-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 发酵工程, E-mail: mjzhu@scut.edu.cn

terpenoids, and other active ingredients, which produce potent regulatory effects on the color, oxidation, and flavor of meat products as well as the generation of harmful substances in these products. This article reviews the key quality changes in pre-prepared meat dishes, typical active substances of plants, and application status of natural active substances in pre-prepared meat dishes as well as explores the existing problems and future development direction of the current plant resources in improving the quality of pre-prepared meat dishes. This review can serve as a reference for high-quality development of the pre-prepared meat dish industry.

**Key words:** pre-prepared meat dishes; natural antioxidants; toxic substances; application

畜禽肉制品富含蛋白质、脂质、矿物质等营养成分,是人们日常饮食中不可或缺的一部分。随着城市生活节奏加快,肉类预制菜肴应运而生。肉类预制菜肴中丰富的营养物质在加工和贮存过程中容易发生氧化损伤或被微生物污染,造成食品品质的破坏,有时甚至产生威胁产品安全性的成分<sup>[1]</sup>。为维持食品货架期,在肉类预制菜中加入食品添加剂是改善食品品质和保证安全性的有效方式之一。然而常见的人工食品添加剂如丁基羟基茴香醚(Butyl Hydroxyanisole, BHA)、二丁基羟基甲苯(Butylated Hydroxytoluene, BHT)、特丁基对苯二酚(Tert-Butyl Hydroquinone, TBHQ)、亚硝酸盐等被证明存在着诱发人体肝损伤、致癌等健康隐患<sup>[2,3]</sup>,不符合现代人追求安全健康的消费观念,逐渐被摒弃。从植物资源中开发天然的肉类预制菜肴品质调节剂,替代人工食品添加剂,实现预制菜肴向营养健康转型升级成为当前肉类预制菜产业的研究热点。

天然植物中常含有的多酚类化合物、有机酸以及萜类化合物等被证实具有抗氧化与抗菌特性,能够抑制加工与贮藏过程中肉制品的过氧化反应、毒害物质的形成与积累以及微生物污染<sup>[4,5]</sup>。对植物中的活性成分进行提取,开发天然肉制品添加剂<sup>[6]</sup>,有望在提升肉类预制菜品质的同时减少传统肉制品添加剂对人体的潜在危害,具有广阔发展前景。因此,本文将从肉类预制菜加工和贮藏过程中关键的品质变化、植物中典型的活性物质、天然活性物质在改善肉类预制菜肴品质中的应用等内容进行综述,并对目前存在的问题进行总结与展望,其结果有助于推进肉类预制菜行业的高质量发展。

## 1 肉类预制菜加工、贮藏过程中关键品质变化

### 1.1 肉类预制菜的脂质氧化

脂质氧化常发生在肉类预制菜加工、贮藏过程中,是一个自发的、不可避免的过程。脂质可通过自氧化、光氧化、酶促氧化这三种方式发生氧化,其中自氧化过程是最主要的方式。自氧化过程是一个自由基链式

反应的过程,包含了链引发、链传递、链终止三个步骤<sup>[7]</sup>。在起始过程中,不饱和脂肪酸发生裂解,形成不稳定的烷基自由基( $R\cdot$ )和游离氢( $H\cdot$ ),烷基自由基随后与分子氧( $^3O_2$ )形成活性较高的过氧化自由基( $ROO\cdot$ )。过氧化自由基进一步从邻近脂质中提取氢,产生氢过氧化物和新的烷基自由基。烷基自由基再次与分子氧反应产生新的过氧化自由基,并不断重复这一过程,使得自由基链式反应实现传递<sup>[8,9]</sup>。在经过多次链传递过程后,自由基之间或与非自由基化合物反应产生非自由基产物,反应终止<sup>[10]</sup>。在光氧化的过程中,敏化剂(如血红素、肌红蛋白)与分子氧相互作用产生单线态氧( $^1O_2$ )与超氧自由基阴离子( $O_2^{\cdot-}$ )。单线态氧可与不饱和脂肪酸反应直接形成氢过氧化物,超氧自由基阴离子则攻击不饱和脂肪酸,引发脂质氧化<sup>[7]</sup>。

在肉类预制菜中,还存在着脂肪氧合酶(Lipoxygenase, LOX)催化脂质氧化。脂肪氧合酶中的 $Fe^{3+}$ 利用从不饱和脂肪酸中提取的氢还原为 $Fe^{2+}$ ,而不饱和脂肪酸则重排为共轭二烯并与氧气反应形成过氧化自由基。而后,过氧化自由基被脂肪氧合酶中 $Fe^{2+}$ 还原并从邻近的脂质中获得质子( $H^+$ )形成过氧化物<sup>[11]</sup>,同时产生了烷基自由基。该过程的循环使得过氧化物和烷基自由基不断形成,也加速了脂质自氧化。

在预制菜的加工过程中,热处理促进自由基的产生,加速脂质氧化<sup>[12]</sup>。研究表明,烘烤、微波等热加工方式均使得肉制品硫代巴比妥酸反应物(Thiobarbituric Acid Reactive Substances, TBARS)相较鲜肉显著增加<sup>[13,14]</sup>。随着烹煮时间和温度的增加,肉制品中共轭二烯含量增加, TBARS 值则因为次级氧化产物的进一步降解或与蛋白质结合而有所下降<sup>[15]</sup>。在脂质氧化的过程中所产生的过氧化物极易分解,形成醇、醛、酮、酯等二级产物。适度的脂质氧化有助于形成挥发性风味物质,使肉制品具有令消费者喜欢的独特风味<sup>[16]</sup>,但在脂质氧化过程中必需脂肪酸的损失也会降低肉类预制菜营养价值<sup>[17]</sup>。当脂质过氧化时,还会产生具有酸败气味的挥发性物质与毒害物质,使得肉类预制菜的品质与安全性下降<sup>[11,18]</sup>。因此需要对肉类预制菜脂质氧化进行调控以保证食品品质。

## 1.2 肉类预制菜的蛋白质氧化

相比于肉类预制菜中的脂质氧化,蛋白质氧化的研究则相对较少。由于食品中蛋白质结构复杂,因此蛋白质可通过不同途径发生氧化并形成不同的氧化产物。从机制上看,蛋白质氧化修饰机制可分为主链氧化、侧链氧化以及与脂质氧化中的羰基化合物反应这三种。蛋白质主链氧化主要是由活性氧攻击引起的,在该过程中会形成以碳为中心的稳定的自由基(P·),在氧气存在的条件下,该自由基可形成烷基过氧自由基(POO·)<sup>[19]</sup>。过氧自由基可从另一蛋白分子中提取氢形成过氧化物(POOH),也可通过消除转化为亚胺<sup>[20]</sup>。过氧化物可在金属催化下分解,最终生成酰胺和蛋白质羰基衍生物。而亚胺水解则会造成蛋白质肽链断裂,使蛋白质片段化<sup>[11]</sup>。在没有氧气的存在下,以碳为中心的自由基可两两反应形成蛋白质交联<sup>[9]</sup>。由于巯基反应活性较高,半胱氨酸较易被活性氧攻击,从而引发蛋白质侧链氧化。其反应机制有两种:一是巯基被氧化为巯基自由基(RS·)后与其他巯基或硫醇盐形成二硫键或是与氧气反应形成巯基过氧自由基(RSOO·);二是氧化形成不稳定的亚磺酸(CysOH),通过进一步氧化可转化为亚磺酸(CysO<sub>2</sub>H)和磺酸(CysO<sub>3</sub>H)或是与另一巯基形成二硫键<sup>[21]</sup>,导致蛋白质交联。

在肉类预制菜中,蛋白质与脂质共存于同一体系中,脂质氧化中形成的羰基化合物可通过多个途径对蛋白质产生影响。脂质过氧化产物丙二醛(Malondialdehyde, MDA)可与赖氨酸残基形成蛋白质羰基衍生物, $\alpha$ 、 $\beta$ -不饱和醛可与赖氨酸的 $\epsilon$ -氨基、半胱氨酸的巯基以及组氨酸的咪唑基发生迈克尔加成反应形成饱和羰基化合物,脂质氧化产生的醛也可以直接与赖氨酸残基反应形成席夫碱衍生物<sup>[22]</sup>。

肉类预制菜中蛋白质受到热加工的影响较大,烘烤、油炸以及新兴的真空低温烹煮技术均对肉制品中蛋白质氧化与交联具有促进作用<sup>[23]</sup>。随着烹煮温度的增加,蛋白质巯基减少,色氨酸损失增大,羰基化加剧,表明蛋白质氧化程度加大<sup>[24]</sup>。Shen等<sup>[25]</sup>研究同样表明,热处理温度会加剧蛋白质的羰基化和交联,使肉制品的质构品质发生改变。蛋白质氧化过程中所出现的蛋白质交联会使得蛋白质聚集以及细胞间的间隙扩大,降低肉制品的持水能力和嫩度<sup>[26]</sup>。相应的,随着肉类预制菜中蛋白质氧化程度加深,肉质的硬度和咀嚼性也会有所增加<sup>[27]</sup>。蛋白质氧化也使得肌原纤维蛋白与挥发性风味物质的结合能力增强,尤其是己醛、庚醛和2-辛酮,抑制了风味物质的释放,影响消费者

对风味物质的感知<sup>[28]</sup>。因此针对不同肉类预制菜对蛋白质氧化进行调控对于延长商品货架期,改善商品品质是很有必要的。

## 1.3 肉类预制菜加工过程中色泽稳定性

在畜禽肉中肌红蛋白占总色素的90%~95%,是影响肉制品肉色呈现的主要因素。肌红蛋白以三种形式存在,分别是脱氧肌红蛋白(Deoxymyoglobin, DeoMb)、氧合肌红蛋白(Oxymyoglobin, OxyMb)以及高铁肌红蛋白(Metmyoglobin, MetMb)<sup>[29]</sup>,三种肌红蛋白的比例决定了肉类预制菜所呈现的颜色。鲜肉中的肌红蛋白多为DeoMb与OxyMb呈紫红或鲜红色,在预制菜热处理过程中会加速DeoMb和OxyMb向MetMb的转化,导致肉色加深。不同的热加工方式对肌红蛋白的影响不同,研究表明相比欧姆加热,水煮处理使肉制品MetMb比例增加,肉色呈现灰红色<sup>[30]</sup>。因此,通过阻止肌红蛋白的过度氧化,可以提高肉类预制菜色泽的稳定性。

此外,肌红蛋白和脂质之间存在着相互促进氧化的作用。一方面,在形成MetMb的过程中产生超氧阴离子和H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>等活性物质,引发脂质氧化<sup>[31]</sup>,MetMb与氢过氧化物结合形成活性中间产物也具有促进脂质氧化的作用<sup>[32]</sup>。另一方面,脂质氧化的醛类产物可通过与肌红蛋白共价结合,改变肌红蛋白的结构,降低MetMb的还原能力同时增强脂质氧化反应<sup>[33]</sup>。

## 1.4 有害物质的生产和积累

肉类预制菜在加工和贮存过程中的过氧化反应有时伴随着有害物质(如亚硝胺、杂环胺)的生成,对食品安全性造成一定的威胁。传统肉制品品质调节剂亚硝酸盐具有调控肉制品色泽、氧化状态及抑制肉制品中肉毒杆菌等微生物生长的作用,但是其过量食用被证实具有一定的生物毒性。这主要是由于在酸性环境下亚硝酸盐容易被分解为亚硝酸酐(N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>),并与食品中的仲胺反应,生成致癌物质亚硝胺<sup>[34]</sup>,其反应式如式(1)所示。仲胺的形成需要经过氨基酸脱羧的过程,亚硝酸盐的分解则需要酸性的环境,且生成亚硝胺的反应需要在高温下进行,因此亚硝胺多在腌制类、烘烤类和发酵类预制菜中被检出<sup>[35]</sup>。然而,有研究发现随着热加工温度的增高,肉制品中亚硝胺含量呈现先上升后下降的趋势,这可能是高温下的脱亚硝基反应引起的<sup>[36]</sup>。



此外,在肉类预制菜热处理过程中,美拉德反应是产生食品特殊的风味和色泽的重要途径,但在该过

程中也会产生杂环胺等具有致突变性的毒害物质,威胁肉类菜肴的营养健康。杂环胺的化学结构包含 2~5 个芳香环以及至少一个环外氨基,根据其化学结构可分为氨基咪唑氮杂芳烃(Amino-Imidazoazaarenes, AIAs)和氨基吡啉(Amino-Carbolines, ACs)两大类<sup>[37]</sup>。肉类中 AIAs 型杂环胺多在约 200 °C 的高温下形成,肌酸在高温下环化形成肌酐,美拉德反应过程中产生的吡啶和吡嗪与肌酐以及醛类化合物反应形成不同结构的 AIAs 型杂环胺。在目前的研究中,根据美拉德反应中所形成的吡啶和吡嗪为活性羰基化合物或是自由基,将 AIAs 类杂环胺的形成机制分为羰基途径和自由及途径<sup>[38]</sup>。而 ACs 型杂环胺则是在高于 250 °C 的烹饪条件下由氨基酸热解产生,然而相关研究相对较少,仅有 Harman 和 Norharman 两种  $\beta$ -吡啉类杂环胺的形成机制较为明确。色氨酸和葡萄糖经过 Amadori 重排后,在活性羰基化合物的存在下环化,最终经过氧化形成  $\beta$ -吡啉<sup>[39]</sup>。在肉类预制菜的加工过程中,热处理时间以及重复加热次数的增加都会使肉制品中的杂环胺含量增加<sup>[40]</sup>。在肉类预制菜在脂质和蛋白质氧化过程中产生的活性羰基物质也参与到杂环胺的形成中,因此对脂质以及蛋白质氧化进行调控对于减少杂环胺的形成有积极的作用。

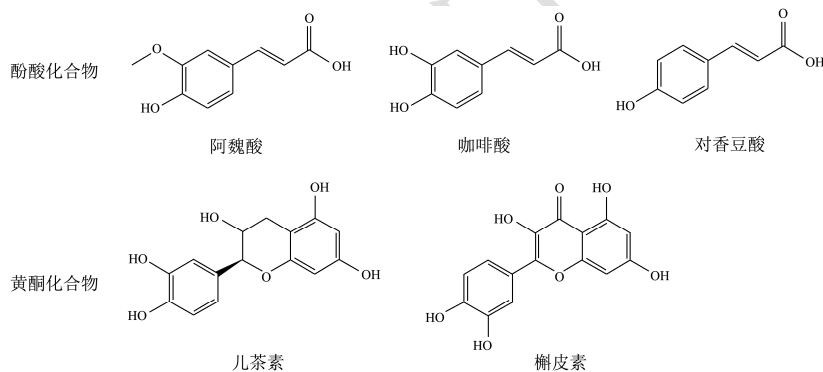
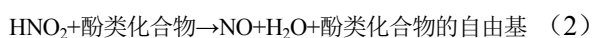


图 1 常见多酚化合物结构

Fig.1 Structure of common polyphenol compounds

多酚类物质可通过将酚羟基上的氢离子转移到自由基清除自由基,而多酚物质自身形成的苯氧基自由基稳定性更强,可通过结合形成二聚体的方式阻断链式氧化反应的发生<sup>[43]</sup>。通过提供电子和质子,多酚物质可以清除非自由基活性物质,如亚硝酸盐<sup>[44]</sup>,其机制如式(2),从而达到抑制亚硝胺形成的目的。



在肉类预制菜中金属离子通过促进电子运输增加自由基形成速率,催化氧化反应的发生<sup>[45]</sup>。多酚类物质可以与作为分子自氧化催化剂的金属离子发生螯合反应,控制其催化活性<sup>[46]</sup>,起到抑制脂质、蛋白质氧化的作用。有研究表明,多酚与金属离子形成的螯合

## 1.5 微生物污染

肉类预制菜中营养物质丰富且 pH 值适中,为腐败微生物和食源性病原体提供了合适的生长条件,在加工和贮藏过程中极易被微生物污染。食源性病原体如单增李斯特菌、金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、沙门氏菌等以及腐败菌如双歧杆菌、乳酸杆菌、假单胞菌等均为肉制品中常见的污染微生物<sup>[41]</sup>。肉类预制菜中微生物的生长会造成产品营养流失、产生异味、变色,病原体污染则会导致食源性疾病的发生,影响着食品品质与安全。

## 2 植物资源中典型的活性成分

### 2.1 多酚

从植物资源中提取出来的生物活性物质多为酚类物质,在结构上可分为酚酸、黄酮等,属于植物的次级代谢产物<sup>[42]</sup>。酚酸是一类含有酚环的有机酸,黄酮则是两个具有酚羟基的苯环通过中央三碳原子相互连接而成的一系列化合物。常见的酚酸如阿魏酸、咖啡酸、对香豆酸等,黄酮如儿茶素、槲皮素等,其化学结构可见图 1。

物相较于纯多酚溶液具有更高的自由基清除能力<sup>[47]</sup>。人们在研究膳食酚酸对铁离子氧化还原的影响时发现,具有邻二羟基结构的酚酸(如儿茶酚酸、绿原酸)不仅具有螯合  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{Fe}^{3+}$  的能力,还能促进  $\text{Fe}^{2+}$  的自氧化,使其氧化为稳定更高、溶解性更低的  $\text{Fe}^{3+}$ ,对铁离子的氧化还原状态进行调控<sup>[48]</sup>。

多酚类物质还可以通过抑制 LOX 的活性达到抑制脂质氧化的目的,起到抗氧化的作用。研究表明,樱桃茎提取物中富含介子酸、槲皮素、咖啡酸、阿魏酸等多酚类化合物,对脂肪氧合酶的半抑制浓度可达到 9.65 mg/mL,具有较好的抗氧化效果<sup>[49]</sup>。此外,多酚类物质还可以与 LOX 活性位点结合,抑制酶活性。

绿原酸可通过疏水相互作用、氢键和范德华力与脂肪氧合酶活性位点附近的氨基酸残基结合,在稳定结合的同时,改变氧合酶的二级结构,抑制了脂肪氧合酶活力<sup>[50]</sup>。

植物多酚通过多个机制发挥抗菌作用。多酚类化合物可破坏微生物细胞壁和细胞膜,改变微生物内部的化学渗透,抑制微生物生长。研究表明,木材多酚通过螯合金属离子的方式影响细菌细胞膜的通透性,抑制细菌生长<sup>[51]</sup>。Jia 等<sup>[52]</sup>也观察到小豆种皮多酚对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌细胞膜系统的破坏作用,增加细胞蛋白和核酸的外渗,降低细胞内的三磷酸腺苷(Adenosine Triphosphate, ATP),促使细菌死亡。除了对微生物的细胞膜造成影响,植物多酚还可以调控微生物内部蛋白表达。Yi 等<sup>[53]</sup>的研究表明,茶多酚除了破坏沙门氏菌细胞膜完整性外,还影响细菌膜蛋白以及参与代谢的分子伴侣和酶的表达量,使得细菌代谢紊乱,抑制其活性。

## 2.2 有机酸

有机酸广泛存在于植物的根、叶和果实中,常见的有机酸包括柠檬酸、草酸、琥珀酸、苹果酸、抗坏血酸等。有机酸的主要抗氧化机制是通过螯合金属离子控制其催化活性,抑制金属离子所催化的自由基形成。研究表明,柠檬酸可螯合铜离子形成配合物,且柠檬酸本身以及螯合物是羟基自由基的有效清除剂<sup>[54]</sup>,作为食品添加剂可以起到改善食品品质的作用。苹果酸同样可以作为螯合剂,与铁、钙等金属离子形成稳定络合物,具有抗氧化活性<sup>[55]</sup>。草酸作为一种强金属螯合剂在体外实验中能够抑制脂质过氧化,显著减少 TBARS 的形成<sup>[56]</sup>。当有机酸大量存在时,微生物细胞内 pH 值高于环境 pH 值,未解离有机酸通过细胞膜进行扩散,有机酸在细胞内部解离为阴离子和 H<sup>+</sup>。一方面阴离子积累到一定浓度,会对细胞产生毒害作用;另一方面,细胞内 pH 值降低会影响胞内酶与蛋白功能,影响细胞正常代谢,抑制微生物活性<sup>[57]</sup>。

在茶油饼中提取的有机酸混合物展示出了较好的抗氧化和抑菌活性,1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-Diphenyl-2-Picrylhydrazyl, DPPH)自由基、羟基自由基、脂质过氧化的 IC<sub>50</sub> 值分别为 184、594、376 mg/L,有效抑制了大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、枯草芽孢杆菌等 6 种常见污染食品微生物<sup>[58]</sup>。蔓越莓果汁中含有多种具有抑菌效果的有机酸,如柠檬酸、苹果酸以及酚酸奎尼酸,其对于大肠杆菌、单增李斯特菌以及沙门氏菌的最小抑菌浓度(Minimum Inhibitory Concentration, MIC)均为 3 133 mg/kg<sup>[59]</sup>。

浆果中的主要有机酸如苹果酸、苯甲酸、乳酸、山梨酸等显著增加了沙门氏菌细胞外膜脂多糖的释放,表明有机酸有效破坏和分解革兰氏阴性菌外膜,抑制了细菌活性<sup>[60]</sup>。

## 2.3 萜类物质

萜类化合物广泛存在于植物精油中,是所有异戊二烯的聚合物以及它们衍生物的总称,根据分子中异戊二烯单位的数量可分为单萜、倍半萜、二萜、三萜、四萜、多萜等。萜类物质通过清除自由基达到抗氧化作用,其中机制仍有待进一步研究。桂元等<sup>[61]</sup>研究发现,茯苓三萜清除超氧阴离子自由基、羟基自由基,IC<sub>50</sub> 值分别为 1.01、0.91 mg/mL。通过蒸馏方式所提取的薄荷提取物含有大量萜类化合物,表现出了较高的清除 2,2'-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐(2,2'-Azinobis-(3-Ethylbenzthiazoline-6-Sulphonate), ABTS)自由基的能力<sup>[62]</sup>。类胡萝卜素属于四萜类化合物,是目前研究较多的天然抗氧化剂,植物中的类胡萝卜素包括胡萝卜素、番茄红素、叶黄素等。类胡萝卜素可以通过清除自由基阻断肉类预制菜中的脂质氧化链式反应,对脂质氧化进行调控。类胡萝卜素与自由基反应可分为电子转移、脱氢反应和加成三种<sup>[63]</sup>。



研究表明,类胡萝卜素在低浓度情况下可以起到抗氧化剂的作用,但在较高浓度下其抗氧化作用可能会减弱,甚至具有促氧化作用,这可能与反应(4)、(5)中所形成的类胡萝卜素自由基参与脂质氧化有关<sup>[64]</sup>。

萜类化合物还可以通过改变细胞膜通透性,使胞内物质渗漏,起到抗菌的作用。百里酚能够改变细胞膜通透性,抑制微生物生长,将其制成纳米乳液后,对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的 MIC 值分别为 103.3 和 60 mg/L<sup>[65]</sup>。Cristina 等<sup>[66]</sup>研究表明,多种萜类化合物具有抗菌活性,其中含氧萜类化合物如百里酚和香芹酚的 MIC 值分别为 0.007、0.03 mg/mL,抗菌活性优于伞花烃、柠檬烯等碳氢化合物(MIC 值为 0.25 mg/mL)。

## 3 植物资源在肉类预制菜的应用

### 3.1 植物资源在抑制脂质氧化中的应用

植物资源中的活性物质经过提取后应用到肉类预制菜中,在抑制过氧化反应上取得了较好的效果。植物中的活性成分大多具有抗氧化效果,通过清除自由

基、螯合金属离子、抑制 LOX 活性等多个途径抑制肉类预制菜中脂质氧化。松针多酚调控熏肉中的脂质氧化,维持脂质过氧化产物(如己醛和壬醛)处于适当范围,改善熏腊肉风味<sup>[67]</sup>。大葱种子多酚(6 g/kg)应用到哈尔滨红肠中,能降低产品 TBARS 值,有效调控产品脂质氧化<sup>[68]</sup>。Vossen 等<sup>[69]</sup>研究结果表明,犬蔷薇提取物能显著抑制法兰克福香肠中脂肪挥发性化合物的形成和积累,改善产品风味。表 1 列举了多种植物资源在抑制肉类预制菜脂质氧化中的应用。

### 3.2 植物资源在抑制蛋白质氧化中的应用

植物资源中的抗氧化活性物质应用到肉类预制菜中同样能调控产品蛋白质氧化,改善产品品质。Parvin

等<sup>[75]</sup>研究发现,肉豆蔻粉能有效减少水煮、烘烤、微波等不同热加工过程中牛肉丸的巯基损失,减缓蛋白质氧化。犬蔷薇提取物能有效降低法兰克福香肠中蛋白质羰基化产物氨基己二酸半醛( $\alpha$ -Amino adipic Semialdehyde, AAS)和 $\gamma$ -谷氨酸半醛( $\gamma$ -Glutamic Semialdehyde, GGS)的含量,缓解蛋白质氧化对产品品质的影响<sup>[69]</sup>。然而 Cando 等<sup>[76]</sup>研究发现添加高浓度柳草提取物(800 mg/kg)反而会促进蛋白质羰基化化合物的形成。这可能是由于高浓度下大部分多酚物质氧化为醌类物质,对碱性氨基酸脱氨起到促进作用,从而催化了羰基化合物的形成。表 2 列举了多种植物资源在抑制肉类预制菜蛋白质氧化中的应用。

表 1 植物资源在抑制脂质氧化中的应用

Table 1 Application of plant resources in inhibiting lipidoxidation

来源	添加量	研究对象	应用效果	文献
西蓝花种子	1.5%	广式腊肠	显著降低肉品 TBARS 值并保持理想肉色和风味。	[70]
茶多酚	0.03%	腊肠	降低了产品的 2-硫代巴比妥酸值,起到了明显的抗氧化作用。	[71]
荞麦壳	0.5%	油炸猪肉丸	显著降低肉丸冷冻过程中过氧化物值和 TBARS 值,抑制脂质氧化。	[72]
香蕉假茎	1.5、3.0、4.5 g/kg	猪肉汉堡肉饼	对冷冻贮藏的熟肉饼起到护色作用,降低 TBARS 值的同时促进了脂质衍生挥发性化合物的形成,有助于形成浓郁风味。	[73]
丁香	0.3 mg/g	烤牛肉	有效清除烤牛肉中的自由基,抑制共轭二烯的形成,使得 TBARS 值显著下降。	[74]

表 2 植物资源在抑制蛋白质氧化中的应用

Table 2 Application of plant resources in inhibiting proteinoxidation

来源	添加量	研究对象	应用效果	文献
荔枝花粉	0.5%、1%、1.5%	乳化猪肉丸	改善了肉丸硬度与渗透值,巯基损失降低,提高了持水性。	[77]
桑葚	0.5、1.0 g/kg	广式腊肠	减少广式腊肠贮藏过程中羰基值的增加量,减缓蛋白质巯基的损失。	[78]
松针提取物	0.025%、0.05%、0.1%、0.2%	熏腊肉	多酚与肌原纤维蛋白稳定结合,改变蛋白质的空间结构,提升熏腊肉的质地和口感。	[67]
犬蔷薇	5%	牛肉汉堡肉饼	减少肉饼色氨酸损失,减少 AAS 和 GGS 的形成,促进了席夫碱形成,增加肉饼硬度。	[79]
丁香	0.1%	牛肉饼	降低冷藏过程中肉饼羰基含量,减少硫醇基损失。	[80]

### 3.3 植物资源在维持色泽稳定中的应用

植物提取物的抗氧化特性能够抑制肉制品中肌红蛋白的过度氧化,维持肉类预制菜色泽稳定。此外,脂质氧化与肌红蛋白氧化相互作用,对脂质氧化的抑制也有利于产品色泽的稳定性。研究发现,添加葡萄籽提取物可使烟熏腊肉 TBARS 值降低 69.8%,肉色红度和亮度有所提升<sup>[81]</sup>。肉豆蔻和柑橘的混合提取物抑制了肉丸冷冻过程中的脂质氧化,提升产品肉色亮度和红度,肉色变化显著减少<sup>[82]</sup>。Naveena 等<sup>[83]</sup>也证

实高剂量的迷迭香提取物(130 mg/kg)显著降低熟牛肉饼的 TBARS 值、过氧化物值和 MetMb 含量,有效抑制脂质氧化和 MetMb 的形成,稳定了肉制品颜色。此外,植物资源中的活性成分如类胡萝卜素是橙色或橙红色的天然色素,起到抗氧化作用的同时赋予产品稳定的红色。Qiu 等<sup>[84]</sup>将番茄粉应用于熟猪肉饼中,番茄红素在有效降低熟猪肉饼 TBARS 值的同时,会使产品红度和亮度更高,且肉色维持效果十分稳定。将富含类胡萝卜素的辣椒粉与具有抗氧化效果的槐花提取物联合应用于干发酵香肠中,能增加产品红度,

有效抑制脂质氧化,改善产品品质<sup>[85]</sup>。

### 3.4 植物资源在减少有害物质中的应用

对肉类预制菜有害物质的调控多集中在对其亚硝酸盐残留量、亚硝胺的形成以及杂环胺的形成这几方面。生物活性物质如多酚以及萜类化合物能够有效清除肉类预制菜中的亚硝酸盐,从而减少亚硝胺的形成。此外,多酚具有抗氧化和抗菌活性,常作为亚硝酸盐的替代物应用到肉类预制菜中。白婷等<sup>[86]</sup>研究表明,商业植物提取物 Nature 10 CS (1%) 的加入能赋予腊肉良好色泽,降低产品中亚硝酸盐残留量,起到了替代亚硝酸钠的作用。Wu 等<sup>[87]</sup>将 600 mg/kg 的包封儿茶素添加到腊肉中,在抑制产品中亚硝胺形成的同时,也使产品在长期贮藏过程中具有更好的口感与风味。

表 3 植物资源在减少有害物质中的应用

Table 3 Application of plant resources in reducing harmful substances

来源	添加量	研究对象	应用效果	文献
茶多酚	300 mg/kg	腊肉	通过还原亚硝酸盐减少 N-亚硝基二甲胺的形成。	[90]
松针	0%、0.025%、0.05%、0.1%、0.2%	烟熏腊肉	通过减少亚硝酸盐残留量,抑制亚硝胺的形成和积累。	[67]
杨桃纤维	7.4%~8.4%	维也纳香肠	减少产品亚硝酸盐残留量,并具有良好的颜色、味道和质地。	[91]
桉柳	0.15、0.30、0.45 g/kg	烤羊肉饼	减少了总杂环胺含量,促进了 ACs 型杂环胺的形成。	[92]
干苹果皮	0%、0.1%、0.15%、0.3%	油炸牛肉饼	抑制杂环芳香胺的形成。	[93]
绿原酸、儿茶素	0.025、0.125、0.625 mmol	烤羊肉饼	抑制前体物质参与到形成杂环胺化学反应,显著抑制 IQx、8-MeIQx、Norharman、Harman 和 PhIP 的形成。	[94]

### 3.5 植物资源在抑菌中的应用

植物资源中的活性成分大多具有抑菌功能,通过破坏细胞膜系统,改变胞内 pH 值,引起胞内物质外渗以及代谢功能紊乱等方式抑制腐败菌和病原菌的活性。富含酚类物质的白刺果实提取物应用到牛肉饼中,显著降低了产品在冷冻贮藏过程中总微生物数量,抑制了微生物生长<sup>[95]</sup>。Macari 等<sup>[96]</sup>研究表明,罗勒、龙蒿、夏薄荷均对冷藏过程中香肠展示出抗菌活性,经过 7 d 的冷藏后,添加 0.2% 罗勒的香肠菌落总数仍符合规范标准。Fan 等<sup>[71]</sup>发现,添加 0.03% 的茶多酚可以有效降低腊肠的活菌总数和脂质氧化程度,延长产品保质期。Mohammadreza 等<sup>[97]</sup>制作含有百里香提取物的聚乳酸活性薄膜并应用于真空包装的熟香肠中,显著抑制腐败菌,有效延长产品保质期大于 40 d。这表明植物资源与其他食品保藏技术相结合应用于肉类预制菜中,能发挥栅栏效应,保证食品品质。

## 4 展望

植物资源中富含酚酸、黄酮类物质、类胡萝卜素等生物活性成分,应用到肉类预制菜中可以有效抑制

杂环胺的形成过程中涉及自由基反应,将具有清除自由基作用的多酚以及萜类化合物应用到抑制杂环胺的形成中,起到较好的效果。由于杂环胺的形成需要肌酸环化形成肌酐,烧烤、煎炸类预制菜在加工过程中所需温度较高,为这一过程提供了条件,因此在关于杂环胺的研究中多以这类产品为研究对象。Mercan 等<sup>[88]</sup>研究了洋蓍提取物对烧烤牛肉和鸡胸肉的影响,结果表明,1% 洋蓍提取物的添加使得烧烤牛肉和鸡胸肉中 12 种杂环胺不同程度地降低,表现出对杂环胺的抑制作用。0.1% 的多香果和紫苏提取物联合应用于煎鸡肉饼中,杂环胺总量降低了 51.59%,抑制效果显著<sup>[89]</sup>。表 3 列举了多种植物资源在抑制肉类预制菜中有害物质形成上的应用。

脂质和蛋白质氧化,并减少亚硝胺和杂环胺等毒害物质的形成和积累。相比人工合成抗氧化剂,植物提取物安全性更高,符合现代消费观念,具有广阔前景。

目前对于植物资源中抗氧化活性物质抑制肉类预制菜中蛋白质氧化和杂环胺形成的机制仍有所欠缺,在现今相关研究的基础上仍无法解释部分高浓度多酚物质在应用中表现出促进蛋白质氧化或促进杂环胺形成和积累的现象。因此,在今后的研究中,有必要对天然抗氧化剂调控蛋白质氧化和杂环胺形成的机理进行深入探究,针对不同产品寻找植物提取物的最适添加量,优化其应用效果。

此外,部分研究表明将植物提取物复配或是与其他保藏工艺如辐射、冷藏等相结合能发挥更好的抗氧化和抑菌效果,因此在未来的研究中可以考虑探究不同植物活性成分之间以及植物活性成分与保藏工艺技术之间的相互作用,增强植物资源在肉类预制菜中的应用效果。

## 参考文献

- [1] Devatkal S K, Thorat P, Manjunatha M. Effect of vacuum packaging and pomegranate peel extract on quality aspects of



- ground goat meat and nuggets [J]. Journal of Food Science and Technology-Mysore, 2014, 51(10): 2685-2691
- [2] LedezmaZamora K, SanchezGutierrez R, Ramirez-Leiva A, et al. Residual nitrite in processed meat products in Costa Rica: method validation, long-term survey and intake estimations [J]. Food Chemistry, 2021, 361: 130082
- [3] Sampath Kumar N S, Nazeer R A, Jaiganesh R. Purification and identification of antioxidant peptides from the skin protein hydrolysate of two marine fishes, horse mackerel (*Magalaspiscordyla*) and croaker (*Otolithesruber*) [J]. Amino Acids, 2012, 42(5): 1641-1649
- [4] Masyita A, Mustika Sari R, DwiAstuti A, et al. Terpenes and terpenoids as main bioactive compounds of essential oils, their roles in human health and potential application as natural food preservatives [J]. Food Chemistry: X, 2022, 13: 100217
- [5] Gibis M, Weiss J. Antioxidant capacity and inhibitory effect of grape seed and rosemary extract in marinades on the formation of heterocyclic amines in fried beef patties [J]. Food Chemistry, 2012, 134(2): 766-774
- [6] Shah M A, Bosco S J, Mir S A. Plant extracts as natural antioxidants in meat and meat products [J]. Meat Science, 2014, 98(1): 21-33
- [7] Domínguez R, Pateiro M, Gagaoua M, et al. A comprehensive review on lipid oxidation in meat and meat products [J]. Antioxidants, 2019, 8(10): 429
- [8] Estévez M. Oxidative damage to poultry: from farm to fork [J]. Poultry Science, 2015, 94(6): 1368-1378
- [9] Cunha L C M, Monteiro M L G, Lorenzo J M, et al. Natural antioxidants in processing and storage stability of sheep and goat meat products [J]. Food Research International, 2018, 111: 379-390
- [10] Hematyar N, Rustad T, Sampels S, et al. Relationship between lipid and protein oxidation in fish [J]. Aquaculture Research, 2019, 50(5): 1393-1403
- [11] Papuc C, Goran G V, Predescu C N, et al. Mechanisms of oxidative processes in meat and toxicity induced by postprandial degradation products: a review [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2017, 16(1): 96-123
- [12] Dai Y, Lu Y, Wu W, et al. Changes in oxidation, color and texture deteriorations during refrigerated storage of ohmically and water bath-cooked pork meat [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2014, 26: 341-346
- [13] Xu L, Cheng JR, Liu XM, 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 - Food Science and Technology, 2019, 100: 62-68
- [14] Lorenzo J M, Cittadini A, Munekata P E, et al. Physicochemical properties of foal meat as affected by cooking methods [J]. Meat Science, 2015, 108: 50-54
- [15] Roldan M, Antequera T, Armenteros M, et al. Effect of different temperature-time combinations on lipid and protein oxidation of sous-vide cooked lamb loins [J]. Food Chemistry, 2014, 149: 129-136
- [16] Lorenzo J M, Carballo J. Changes in physico-chemical properties and volatile compounds throughout the manufacturing process of dry-cured foal loin [J]. Meat Science, 2015, 99: 44-51
- [17] Gruffat D, Bauchart D, Thomas A, et al. Fatty acid composition and oxidation in beef muscles as affected by ageing times and cooking methods [J]. Food Chemistry, 2021, 343: 128476
- [18] Feng X, Moon S H, Lee H Y, et al. Effect of irradiation on the parameters that influence quality characteristics of raw turkey breast meat [J]. Radiation Physics and Chemistry, 2017, 130: 40-46
- [19] Lund M N, Heinonen M, Baron C P, et al. Protein oxidation in muscle foods: a review [J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2011, 55(1): 83-95
- [20] Zhang W, Xiao S, Ahn D U. Protein oxidation: basic principles and implications for meat quality [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2013, 53(11): 1191-1201
- [21] Davies Michael J. Protein oxidation and peroxidation [J]. Biochemical Journal, 2016, 473(7): 805-825
- [22] Zhang W G, Xiao S, Ahn D U. Protein oxidation: basic principles and implications for meat quality [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2013, 53(11): 1191-1201
- [23] Silva F A, Ferreira V C, Madruga M S, et al. Effect of the cooking method (grilling, roasting, frying and sous-vide) on the oxidation of thiols, tryptophan, alkaline amino acids and protein cross-linking in jerky chicken [J]. Journal of Food Science and Technology, 2016, 53(8): 3137-3146
- [24] Mitra B, Lametsch R, Akcan T, et al. Pork proteins oxidative modifications under the influence of varied time-temperature thermal treatments: a chemical and redox proteomics assessment [J]. Meat Science, 2018, 140: 134-144
- [25] Shen YQ, Guo XX, Li XP, et al. Effect of cooking temperatures on meat quality, protein carbonylation and protein cross-linking of beef packed in high oxygen atmosphere [J]. LWT-Food



- Science and Technology, 2022, 154: 112633
- [26] Sun YY, Luo HL, Cao JX, et al. Structural characteristics of Sheldrake meat and secondary structure of myofibrillar protein: effects of oxidation [J]. International Journal of Food Properties, 2017, 20:1553-1566
- [27] Guo X, Wang YQ, Lu SL, et al. Changes in proteolysis, protein oxidation, flavor, color and texture of dry-cured mutton ham during storage [J]. LWT - Food Science and Technology, 2021, 149: 111860
- [28] Shen H, Stephen Elmore J, Zhao M, et al. Effect of oxidation on the gel properties of porcine myofibrillar proteins and their binding abilities with selected flavour compounds [J]. Food Chemistry, 2020, 329: 127032
- [29] Bak K H, Bolumar T, Karlsson A H, et al. Effect of high pressure treatment on the color of fresh and processed meats: a review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(2): 228-252
- [30] Dai Y, Miao J, Yuan S Z, et al. Colour and sarcoplasmic protein evaluation of pork following water bath and ohmic cooking [J]. Meat Science, 2013, 93(4): 898-905
- [31] 王兆明,贺稚非,李洪军.脂质和蛋白质氧化对肉品品质影响及交互氧化机制研究进展[J].食品科学,2018,39(11):295-301
- [32] Baron C P, Andersen H J. Myoglobin-induced lipid oxidation. a review [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(14): 3887-3897
- [33] Hasan M M, Sood V, Erkinbaev C, et al. Principal component analysis of lipid and protein oxidation products and their impact on color stability in bison longissimus lumborum and psoas major muscles [J]. Meat Science, 2021, 178: 108523
- [34] Lu JN, Li MY, Huang YS, et al. A comprehensive review of advanced glycosylation end products and N-nitrosamines in thermally processed meat products [J]. Food Control, 2022, 131: 108449
- [35] Honikel K O. The use and control of nitrate and nitrite for the processing of meat products [J]. Meat Science, 2008, 78(1-2): 68-76
- [36] Deng S, Bai X, Li Y, et al. Changes in moisture, colour, residual nitrites and N-nitrosamine accumulation of bacon induced by nitrite levels and dry-frying temperatures [J]. Meat Science, 2021, 181: 108604
- [37] 程轶群,雷阳,周兴虎,等.传统肉制品中杂环胺研究进展[J].食品科学,2022,43(5):316-327
- [38] Zamora R, Hidalgo F J. Formation of heterocyclic aromatic amines with the structure of aminoimidazoarenes in food products [J]. Food Chemistry, 2020, 313: 126128
- [39] Dong H, Xian Y, Li H, et al. Potential carcinogenic heterocyclic aromatic amines (HAAs) in foodstuffs: formation, extraction, analytical methods, and mitigation strategies [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 19(2): 365-404
- [40] Zhou Y J, Zhang Y X, Dong X W. Determination of heterocyclic amines in braised sauce beef and the effects of different cooking conditions on the formation of heterocyclic amines [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(2): 617-627
- [41] 张志刚,林祥木,胡涛,等.即食肉制品微生物污染及其控制技术研究进展[J].肉类研究,2020,34(1):94-102
- [42] Gutiérrez-Del-Río I, López-Ibáñez S, Magadán-Corpas P, et al. Terpenoids and polyphenols as natural antioxidant agents in food preservation [J]. Antioxidants, 2021, 10(8): 1264
- [43] Choe E. Roles and action mechanisms of herbs added to the emulsion on its lipid oxidation [J]. Food Science and Biotechnology, 2020, 29(9): 1165-1179
- [44] Ben TT, Wu P, Zou H, et al. Characterization of nitrite degradation by polyphenols in sea buckthorn (*Hippophaë rhamnoides* L.) by density function theory calculations [J]. LWT - Food Science and Technology, 2021, 149: 111884
- [45] Ramanathan L, Das N P. Inhibitory effects of some natural products on metal-induced lipid oxidation in cooked fish [J]. Biological Trace Element Research, 1992, 34(1): 35-44
- [46] Jomova K, Hudecova L, Lauro P, et al. A switch between antioxidant and prooxidant properties of the phenolic compounds myricetin, morin, 3', 4'-Dihydroxyflavone, taxifolin and 4-Hydroxy-Coumarin in the presence of copper (II) ions: a spectroscopic, absorption titration and DNA damage study [J]. Molecules, 2019, 24(23): 4335
- [47] 张智,于震,王振宇,等.落叶松多酚与钙、锌离子螯合能力研究[J].食品科技,2014,39(3):160-163
- [48] Chvátalová K, Slaninová I, Březinová L, et al. Influence of dietary phenolic acids on redox status of iron: ferrous iron autoxidation and ferric iron reduction [J]. Food Chemistry, 2008, 106(2): 650-660
- [49] Demir T, Akpınar Ö, Kara H, et al. Cherry stem phenolic compounds: optimization of extraction conditions and *in vitro* evaluations of antioxidant, antimicrobial, antidiabetic, anti-inflammatory, and cytotoxic activities [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(10): e14804
- [50] Cao Q, Huang Y, Zhu Q F, et al. The mechanism of chlorogenic acid inhibits lipid oxidation: an investigation using

- multi-spectroscopic methods and molecular docking [J]. Food Chemistry, 2020, 333: 127528
- [51] Plumed-Ferrer C, Väkeväinen K, Komulainen H, et al. The antimicrobial effects of wood-associated polyphenols on food pathogens and spoilage organisms [J]. International Journal of Food Microbiology, 2013, 164(1): 99-107
- [52] Jia R, Ge ST, Ren SD, et al. Antibacterial mechanism of adzuki bean seed coat polyphenols and their potential application in preservation of fresh raw beef [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2021, 56(10): 5025-5039
- [53] Yi S, Wang W, Bai F, et al. Antimicrobial effect and membrane-active mechanism of tea polyphenols against *Serratia marcescens* [J]. World Journal of Microbiology & Biotechnology, 2014, 30(2): 451-460
- [54] Martínez A, Vargas R, Galano A. Citric acid: a promising copper scavenger [J]. Computational and Theoretical Chemistry, 2018, 1133: 47-50
- [55] Marques C, Sotiles A R, Farias F O, et al. Full physicochemical characterization of malic acid: emphasis in the potential as food ingredient and application in pectin gels [J]. Arabian Journal of Chemistry, 2020, 13(12): 9118-9129
- [56] Kayashima T, Katayama T. Oxalic acid is available as a natural antioxidant in some systems [J]. Biochimica et Biophysica ACTA-General Subjects, 2002, 1573(1): 1-3
- [57] Mani-López E, García H S, López-Malo A. Organic acids as antimicrobials to control *Salmonella* in meat and poultry products [J]. Food Research International, 2012, 45(2): 713-721
- [58] Zhang D, Nie S, Xie M, et al. Antioxidant and antibacterial capabilities of phenolic compounds and organic acids from *Camellia oleifera* cake [J]. Food Science and Biotechnology, 2020, 29(1): 17-25
- [59] Harich M, Maherani B, Salmieri S, et al. Antibacterial activity of cranberry juice concentrate on freshness and sensory quality of ready to eat (RTE) foods [J]. Food Control, 2017, 75: 134-144
- [60] Alakomi HL, Puupponen-Pimiä R, Aura A-M, et al. Weakening of *Salmonella* with selected microbial metabolites of berry-derived phenolic compounds and organic acids [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(10): 3905-3912
- [61] 程水明, 桂元, 沈思, 等. 茯苓皮三萜类物质抗氧化活性研究[J]. 食品科学, 2011, 32(9): 27-30
- [62] Pavlić B, Teslić N, Zengin G, et al. Antioxidant and enzyme-inhibitory activity of peppermint extracts and essential oils obtained by conventional and emerging extraction techniques [J]. Food Chemistry, 2021, 338: 127724
- [63] ElAgamey A, Lowe G M, Mearns D J, et al. Carotenoid radical chemistry and antioxidant/pro-oxidant properties [J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 2004, 430(1): 37-48
- [64] Eghbaliferiz S, Iranshahi M. Prooxidant activity of polyphenols, flavonoids, anthocyanins and carotenoids: updated review of mechanisms and catalyzing metals [J]. Phytotherapy Research, 2016, 30(9): 1379-1391
- [65] Sepahvand S, Amiri S, Radi M, et al. Antimicrobial activity of thymol and thymol-nanoemulsion against three food-borne pathogens inoculated in a sausage model [J]. Food and Bioprocess Technology, 2021, 14(10): 1936-1945
- [66] Guimarães A C, Meireles L M, Lemos M F, et al. Antibacterial activity of terpenes and terpenoids present in essential oils [J]. Molecules, 2019, 24(13): 2471
- [67] Xu Q D, Zhou Z Q, Jing Z, et al. Pine needle extract from *Cedrus deodara*: Potential applications on hazardous chemicals and quality of smoked bacon and its mechanism [J]. Food Control, 2021, 130: 108368
- [68] Qin L, Yu J, Zhu J, et al. Ultrasonic-assisted extraction of polyphenol from the seeds of *Allium senescens* L. and its antioxidative role in Harbin dry sausage [J]. Meat Science, 2021, 172: 108351
- [69] 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
- [70] 刘文营, 李享, 成晓瑜. 添加西兰花种子水提取物改善腊肉色泽和风味提高抗氧化性[J]. 农业工程学报, 2018, 34(21): 288-294
- [71] Fan W J, Chen Y C, Sun J X, et al. Effects of tea polyphenol on quality and shelf life of pork sausages [J]. Journal of Food Science and Technology-Mysore, 2014, 51(1): 191-195
- [72] Hes M, Szwengiel A, Dziejdz K, et al. The effect of buckwheat hull extract on lipid oxidation in frozen-stored meat products [J]. Journal of Food Science, 2017, 82(4): 882-889
- [73] Carballo D E, Caro I, Gallego C, et al. Banana pseudo-stem increases the water-holding capacity of minced pork batter and the oxidative stability of pork patties [J]. Foods, 2021, 10(9): 2173
- [74] Bao Y J, Ren X P, Zhu Y X, et al. Comparison of lipid radical scavenging capacity of spice extract in situ in roast beef with DPPH and peroxy radical scavenging capacities *in vitro* models [J]. LWT - Food Science and Technology, 2020, 130: 109626
- [75] Parvin R, Zahid M A, Seo J K, et al. Influence of reheating methods and frozen storage on physicochemical characteristics

- and warmed-over flavor of nutmeg extract-enriched precooked beef meatballs [J]. *Antioxidants (Basel)*, 2020, 9(8): 670
- [76] Cando D, Morcuende D, Utrera M, et al. Phenolic-rich extracts from Willowherb (*Epilobiumhirsutum* L.) inhibit lipid oxidation but accelerate protein carbonylation and discoloration of beef patties [J]. *European Food Research and Technology*, 2014, 238(5): 741-751
- [77] Ding Y, Wang S Y, Yang D J, et al. Alleviative effects of litchi (*Litchi chinensis*Sonn.) flower on lipid peroxidation and protein degradation in emulsified pork meatballs [J]. *Journal of Food and Drug Analysis*, 2015, 23(3): 501-508
- [78] 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
- [79] Utrera M, Morcuende D, Ganhão R, et al. Role of phenolics extracting from *Rosa canina* L. on meat protein oxidation during frozen storage and beef patties processing [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2014, 8(4): 854-864
- [80] Zahid M A, Choi J Y, Seo J-K, et al. Effects of clove extract on oxidative stability and sensory attributes in cooked beef patties at refrigerated storage [J]. *Meat Science*, 2020, 161: 107972
- [81] Wang X H, Zhang Y L, Ren H Y. Effects of grape seed extract on lipid oxidation, biogenic amine formation and microbiological quality in Chinese traditional smoke-cured bacon during storage [J]. *Journal of Food Safety*, 2018, 38(2): e12426
- [82] Nishad J, Koley T K, Varghese E, et al. Synergistic effects of nutmeg and citrus peel extracts in imparting oxidative stability in meat balls [J]. *Food Research International*, 2018, 106: 1026-1036
- [83] Naveena B M, Vaithyanathan S, Muthukumar M, et al. Relationship between the solubility, dosage and antioxidant capacity of carnosic acid in raw and cooked ground buffalo meat patties and chicken patties [J]. *Meat Science*, 2013, 95(2): 195-202
- [84] Qiu Z Z, Chin K B. Physicochemical properties and shelf-life of raw and cooked patties added with various levels of grape tomato powder by different drying methods [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2021, 146: 111415
- [85] Tang R, Peng J, Chen L, et al. Combination of *Flossophorae* and chili pepper as a nitrite alternative improves the antioxidant, microbial communities and quality traits in Chinese sausages [J]. *Food Research International*, 2021, 141: 110131
- [86] 白婷,周星辰,何丹,等.天然植物提取物对四川腊肉产品特性的影响研究[J].*中国调味品*,2021,46(6):77-82
- [87] Wu J, Guan R, Huang H, et al. Effect of catechin liposomes on the nitrosamines and quality of traditional Chinese bacon [J]. *Food & Function*, 2019, 10(2): 625-634
- [88] Tengilimoglu-Metin M M, Kizil M. Reducing effect of artichoke extract on heterocyclic aromatic amine formation in beef and chicken breast meat [J]. *Meat Science*, 2017, 134: 68-75
- [89] Khan I A, Luo J, Shi H, et al. Mitigation of heterocyclic amines by phenolic compounds in allspice and *Perilla frutescens* seed extract: The correlation between antioxidant capacities and mitigating activities [J]. *Food Chemistry*, 2022, 368: 130845
- [90] Wang Y L, Li F, Zhuang H, et al. Effects of plant polyphenols and  $\alpha$ -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
- [91] Vivar-Vera M L A, Perez-Silva A, Ruiz L, Ii, et al. Chemical, physical and sensory properties of Vienna sausages formulated with a starfruit dietary fiber concentrate [J]. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 2018, 55(8): 3303-3313
- [92] Ren X P, Li M Y, Wang W, et al. Inhibitory effect of tamarixramosissima extract on the formation of heterocyclic amines in roast lamb patties by retarding the consumption of precursors and preventing free radicals [J]. *Foods*, 2022, 11(7): 1000
- [93] Sabally K, Sleno L, Jauffrit J-A, et al. Inhibitory effects of apple peel polyphenol extract on the formation of heterocyclic amines in pan fried beef patties [J]. *Meat Science*, 2016, 117: 57-62
- [94] Ding X Q, Zhang D Q, Liu H, et al. Chlorogenic acid and epicatechin: an efficient inhibitor of heterocyclic amines in charcoal roasted lamb meats [J]. *Food Chemistry*, 2022, 368: 130865
- [95] Mariem C, Sameh M, Nadhem S, et al. Antioxidant and antimicrobial properties of the extracts from *Nitrariaretusa* fruits and their applications to meat product preservation [J]. *Industrial Crops and Products*, 2014, 55: 295-303
- [96] Macari A, Sturza R, Lung I, et al. Antimicrobial effects of basil, summer savory and tarragon lyophilized extracts in cold storage sausages [J]. *Molecules*, 2021, 26(21): 6678
- [97] Rezaeigolestani M, Misaghi A, Khanjari A, et al. Antimicrobial evaluation of novel poly-lactic acid based nanocomposites incorporated with bioactive compounds *in-vitro* and in refrigerated vacuum-packed cooked sausages [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2017, 260: 1-10