

香辛料提取物及其在肉制品抑菌防腐中的应用进展

杨轶滢¹, 崔钊伟², 王卫^{3*}, Jaekel Carsten Stephan Herbert³, 张佳敏³, 刘雅宁¹, 郭育涛¹

(1. 成都大学食品与生物工程学院, 四川成都 610106) (2. 四川铁骑力士集团, 四川绵阳 621000)

(3. 成都大学肉类加工四川省重点实验室, 四川成都 610106)

摘要: 肉品腐败被认为是食品工业中最重要的经济和健康问题之一, 而抑菌防腐剂的应用是阻止化学变质和微生物腐败的主要手段。由于消费者对化学防腐剂安全性的担忧, 相对更为安全的天然或“绿色”的替代品越来越受到关注。研究表明, 天然香辛料提取物具有显著的抑菌性和抗氧化性, 其作用机理是基于对微生物细胞壁的降解、细胞膜的破坏、膜蛋白的损伤, 以及细胞内容物的泄漏和质子源的消耗等几个靶点的作用。该研究从香辛料提取物的来源、提取方法、主要活性成分、抑菌机制、体外抑菌实验和协同作用进行概述, 并重点总结了天然香辛料提取物在肉品中的抑菌防腐作用及其应用的研究进展, 以期为肉制品加工寻求更为安全而有效的防腐保鲜方法提供参考。

关键词: 香辛料; 天然提取物; 抗菌活性; 肉制品; 防腐保鲜

文章编号: 1673-9078(2022)03-314-327

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.3.0655

Spice Extracts and Their Application of Antimicrobial and Preservation Activities in Meat Products

YANG Yixi¹, CUI Zhaowei², WANG Wei^{3*}, Jaekel Carsten Stephan Herbert³, ZHANG Jiamin³, LIU Yaning¹, GUO Yutao¹

(1.College of Food and Biological Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China)

(2.Tie Qi Li Shi Group, Mianyang, 621000, China)

(3.Key Laboratory of Meat Processing in Sichuan Province, Chengdu University, Chengdu 610106, China)

Abstract: Meat spoilage is one of important economic and health issues in the area of food industry. The application of antimicrobial agents to meat products is one of major tool for inhibiting chemical deterioration and microbial growth. Due to consumers' concerns about the safety of some chemical preservatives, people are increasingly interested in natural or "green" alternatives. Many researches demonstrated that the natural spice extract has significant antibacterial and antioxidant properties. Its mechanism is based on the degradation of microbial cell wall, the destruction of cell membrane, the damage of membrane protein, the leakage of cell content and the consumption of Proton source. In this paper, the sources, extraction methods, main active components, antibacterial mechanisms, *in vitro* antimicrobial experiments and synergistic effects were summarized, and the research progress of antimicrobial effects and the applications particularly in meat products were reviewed, in order to provide the reference for seeking more safe and effective preservative methods in meat products processing.

Key words: spices; natural plant extracts; antimicrobial activities; meat product; preservation

引文格式:

杨轶滢,崔钊伟,王卫,等.香辛料提取物及其在肉制品抑菌防腐中的应用进展[J].现代食品科技,2022,38(3):314-327

YANG Yixi, CUI Zhaowei, WANG Wei, et al. Spice extracts and their application of antimicrobial and preservation activities in meat products [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(3): 314-327

收稿日期: 2021-06-22

基金项目: 四川省肉类加工重点实验室开放基金项目(20-R-27; 21-R-35); 川菜发展研究中心规划项目(CC21Z03); 成都市科技局技术创新研发项目(2021-YF05-00358-SN); 四川省科技厅重点研发项目(2020YFN0147); 四川省科技厅国(境)外高端人才引进项目(SYZ202123)

作者简介: 杨轶滢(1984-), 女, 副研究员, 研究方向: 食品化学, E-mail: yangyixi1011@cdu.edu.cn

通讯作者: 王卫(1958-), 男, 教授, 研究方向: 肉类加工与储藏, E-mail: wangwei8619@163.com

肉的食用,特别是红肉的食用可以追溯到远古年代,至今仍然是一种主导的生活方式和现代社会不可缺少的营养形式。由于肉类制品具有高水分和营养含量,是腐败性和致病性微生物的良好底物^[1],其加工和贮藏中极易变质或腐败。肉品的质量受微生物生长和脂质氧化影响很大,该因素直接决定了肉品的感官、风味和营养价值^[2]。近年来,致病性和腐败性微生物引起的食源性疾病屡见不鲜,消费者越来越重视肉品的食用安全^[3]。

为维持货架期,一些化学防腐剂如硝酸盐等常加入到肉品中,这些化学防腐剂主要具有抑菌、抗氧化和防褐变的功效^[4]。各国对化学抑菌剂的使用范围和使用量均有严格的限制,常规上可适量使用的主要有乙酸、醋酸钾、醋酸钙、乳酸、二氧化碳和苹果酸;限量使用的还包括苯甲酸和苯甲酸盐(ADI 5 mg/kg bw)、山梨酸和山梨酸钾(ADI 25 mg/kg bw)、硝酸盐(ADI 3.7 mg/kg bw)和亚硝酸盐(ADI 0.07 mg/kg bw)等。然而长期的研究表明,一些化学防腐剂的过多和不当使用,可能存在致癌、造成皮肤和呼吸道过敏、失眠、多动以及引发心血管疾病等安全隐患^[5,6]。由于对化学防腐剂安全性的担忧,植物提取物等相对更为安全的天然或“绿色”的天然抑菌剂类替代品越来越受到关注。这些天然植物提取的防腐剂被认为更为安全可靠,在可食用剂量下鲜少发现副作用,同时在肉品加工和货架期可呈现足够的稳定性^[7]。

天然抑菌剂来源广阔,香辛料是一个重要的来源,从古至今其在食品和医药方面有广泛的应用。由于其抑菌抗氧化作用的香辛料具有香、辛、麻、辣、苦、甜等典型的气味,还主要作为赋予肉品良好的风味而被广泛使用,并且有些甚至具有一定的抗癌、抗衰、抗炎、抗诱变、抗过敏等生物活性^[8,9]。因此,香辛料提取物可作为具有抑菌、抗氧化、增色、调味、保健等多重功效的食品添加剂使用^[10],本文对香辛料的来源、活性提取组分、抑菌及抗氧化活性,特别是其在各类肉品中的防腐保鲜作用及其应用进行概要综述。

1 香辛料的来源、提取及主要活性成分

1.1 香辛料的来源

香辛料是常见的食物附属物,几千年来一直作为调香、调味剂使用,因其味道特征而闻名,具有芳香特征和对三叉神经的刺激作用。有强烈香味的香辛料被称为芳香香料,如:孜然、薄荷、丁香;有辛辣感觉的香辛料被称为辣香料,如:辣椒、花椒、姜^[11]。从植物科别来看,香辛料在葱属科(大蒜、韭菜和洋

葱)和伞型科(茴香、香菜、芹菜和孜然)植物中占比较多。从植物提取部位来看,香辛料可来源于新鲜或干燥植物的各个部位:树皮(肉桂)、鳞茎(大蒜或洋葱)、花(丁香)、果实(辣椒)、根茎(姜)、种子(罂粟籽)或整个植物。在天然植物提取物的划分上,香辛料和草本提取物没有严格的界限,正如薄荷有时被称为草本提取物^[12]。本文所陈述的香辛料为广义的香辛料提取物,包括植物中所有具有强烈芳香和辛香的植物性制品。

1.2 香辛料提取物的提取、分离及鉴定

已有关天然植物提取物提取方法的详细介绍^[3],除传统的溶剂浸提法外,一些改良的提取方法也广泛应用于香辛料的提取,如索式提取法、水蒸气蒸馏法、亚临界水提取法、超临界CO₂萃取法、脉冲电萃取法、微波辅助提取法、超声辅助提取法、超临界流体萃取、固相萃取和加压液体提取法等^[13]。提取方法和介质的不同,香辛料提取物的成分、产率、效能、感官特性和抗菌活性均有较大区别。比如,通过溶剂提取与水蒸气蒸馏所得的提取物成分有所差别,从而影响香辛料提取物的抗菌性能。实验证明,己烷为溶剂的香辛料提取物比水蒸汽蒸馏所得提取物具有更大的抗菌活性。又如,在低温和高压下香辛料通过液体二氧化碳提取会产生更自然的感官特性,但稍显昂贵。另外,无溶剂微波辅助萃取法在一些香辛料得提取上显示出较好的效能。Zhao等^[14]在2018年就比较了天竺桂叶采用水蒸气蒸馏和无溶剂微波辅助萃取两种方法下其提取物产率的对比。在40 min 540 W的微波辐射功率下,提取物产率为6.50 mL/kg;而在200 min 540 W电加热装置下,进行水蒸气蒸馏下的产率为5.46 mL/kg。同时,Bousbia^[15]比较了水蒸气蒸馏和微波水扩散重力法对迷迭香叶提取的产率。在得到相同产率的情况下,微波水扩散重力法只需要15 min而水蒸气蒸馏需要反应180 min的时间。

对香辛料提取物,可根据其混合物中各化合物的分子结构、物理性质和分子间作用力等的不同,利用色谱法还可对其混合成分进行分离。常用的色谱法有:薄层层析法、柱层析法、液相色谱法和气相色谱法。提取物中不同的化合物具有不同的官能团和分子特性,如:极性、氢键、偶极-偶极相互作用,这就使得在薄层层析和柱层析法中,各化合物显示出不同的保留系数,在液相色谱法和气相色谱法中表现为不同的保留时间,从而对混合物进行分离^[16]。同时,液相色谱-质谱(LC-MS)和气相色谱-质谱(GC-MS)联用技术可更高效的将香辛料提取物化学成分的定性、定

量分析结合了起来。比如在对红景天根甲醇提取物的分析中, 就通过 GC-MS 联用的分析方法分离得到了共 18 种不同的化合物, 根据峰面积百分数并与 NIST 数据库进行比对可鉴定出主要存在的化合物 (穿贝海绵甾醇 21.91%、十八烷基酰氯 17.01%、对羟基苯乙酮 11.07%) [17]。利用非靶向的 LC-MS 联用方法也成功分离并鉴定了从 5 种不同辣椒样品中提取的 186 种酚类和多羟基化合物, 其中包括花青素、原花青素、儿茶素衍生物、黄酮、黄酮醇、异黄酮和奎宁酸等 [18]。另外, 顶空固相微萃取法与气质联用技术相结合的方法极大简化了样品的提取、分离和鉴定。利用顶空固相微萃取法可直接对香辛料原料进行萃取, 操作简单、高效快速。样品预处理后直接插入气相色谱仪进样口进行后续分离鉴定。江汉美团队就利用了顶空固相微萃取法与气质联用技术对 5 种姜科香辛料的挥发成分进行分析, 分别从草果、白豆蔻、生姜、砂仁、山奈鉴定出 39、40、54、42 种成分 [19]。

1.3 香辛料提取物的主要抑菌成分

香辛料富含精油, 具有显著的抗菌活性, 因此这些物质可以用来延迟或抑制致病微生物或破坏微生物的生长 [20]。许多香辛料都具有抗菌特性, 包括大蒜、洋葱、肉桂、肉豆蔻、咖喱、芥末、黑胡椒、百里香、薄荷 [21,22], 以及迷迭香、牛至、鼠尾草、茴香、罗勒、姜黄、香菜和姜等 [23,24]。它们的活性取决于香辛料的种类、成分和浓度、目标微生物的类型和浓度、底物的组成以及加工和储存条件 [25]。

不同香辛料提取物的活性成分各不相同, 同种香辛料的成分也受收获季节和地理因素的影响 [26]。一般来说, 在开花期间或开花后立即收获的香辛料提取物具有最强的抗菌活性 [27]。另外, 来自同一株香辛料不同部位的活性成分也会有很大的差异。例如, 从香菜种子中获得的提取物成分与同一香菜未成熟的叶子中的提取的成分有较大的不同 [28]。Senatore 等 [29] 通过 GC-MS 分析了在不同生长时期百里香通过水蒸气蒸馏所得精油提取物中有 64 种成分的存在。有的香辛料提取物中主要成分可占总量的 85%, 而其他次要成分仅以痕量存在 [30]。这些主要的抗菌活性化合物主要是植物的次生代谢产物, 可分为酚类、酚酸类、醌类、萜类、黄酮和单宁等 [31]。其中, 酚酸类化合物主要负责提取物的抗菌特性 [32], 而其所含 -OH 基团的个数直接跟抗菌强弱有关 [33]。常见的一些香辛料提取物的化学结构可见图 1 [34]。一些证据表明, 除主要成分外,

次要成分在抗菌活性中也起着关键的作用, 其主要原因可能是各成分间的协同作用所发挥的功效。这些协同作用在鼠尾草、牛至和百里香等香辛料提取物的研究中均有发现 [25,35]。各类香辛料提取物主要活性成分详见表 1。

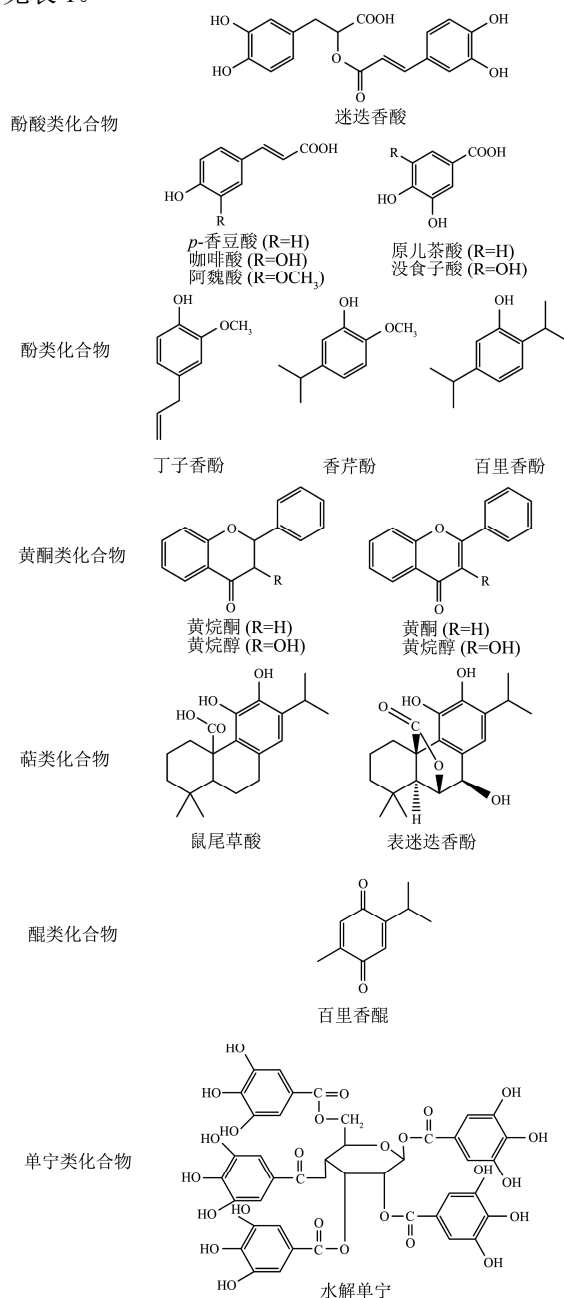


图 1 一些香辛料提取物的化学结构

Fig.1 The chemical structures for some spice extracts

根据已有的研究结果, 香辛料可以得出大致的抗菌活性比较为: 牛至/丁香/香菜/肉桂>百里香>薄荷>迷迭香>芥末>鼠尾草。其化学组分的大致抗菌活性为: 丁子香酚>香芹酚/肉桂酸>罗勒甲基佳味酚>肉桂醛>柠檬醛/香叶醇 [45]。

表 1 香辛料提取物的主要活性成分

Table 1 Sources and components of various spice extracts

名称	拉丁名	活性成分	参考文献
黑胡椒	<i>Piper nigrum L.</i>	3- Δ -萜烯、石竹烯、柠檬烯、 α -蒎烯和 β -蒎烯	[36]
牛至	<i>Origanum vulgare subsp. hirtum</i>	香芹酚、百里香酚、单萜烯、 γ -萜烯和对伞花烃	[37]
迷迭香	<i>Rosmarinus officinalis</i>	鼠尾草酸和双酚松香烷二萜	[38]
肉桂	<i>Cinnamomum zeylandicum</i>	反式肉桂醛	[39]
鼠尾草	<i>Salvia officinalis L.</i>	萜酮、桉叶素、侧柏酮、 α -蒎烯和 β -蒎烯	[27]
百里香	<i>Thymus vulgaris</i>	百里香酚、香芹酚、 γ -萜烯和对伞花烃	[32]
姜	<i>Zingiber officinale</i>	姜醇、姜酮酚、姜烯酮	[40]
藏红花	<i>Crocus sativus</i>	藏红花素、藏花酸	[41]
马郁兰	<i>Origanum. majorana</i>	3-萜烯、百里酚、松油烯-4-醇和水合桉烯	[42]
大蒜	<i>Allium sativum</i>	蒜素、二烯丙基二硫、二烯丙基三硫化物、二烯丙基四硫化物和己二烯一硫化物	[43]
芥末	<i>Brassica nigra</i>	异硫氰酸烯丙酯	[44]

2 香辛料提取物的抑菌作用

2.1 香辛料提取物的抗菌机制

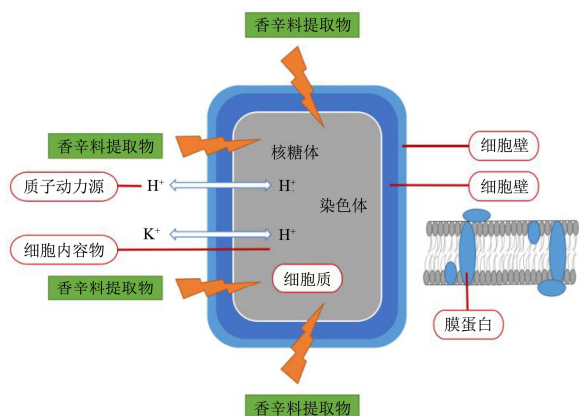


图 2 香辛料提取物在细菌细胞中的几个作用靶点^[53]

Fig.2 Several targets for spice extracts in bacterial cell

由于香辛料提取物中存在大量不同的化合物，其抗菌活性并不采用同一特定机制，而是与细胞中几个主要作用靶点有关，如图 2 所示。其中包括细胞壁降解、细胞膜的破坏、膜蛋白的损伤、细胞内容物的泄漏和质子动力源的消耗。在这些抑菌机制中，并非每个靶点是独立运行的，更多的是一个联动的过程^[46]。香辛料精油的一个重要特征是其疏水性，因此其能够分割细菌细胞膜脂质和线粒体，干扰结构和提高渗透性^[47]，然后再发生离子和其它细胞内容物的泄漏^[48]。虽然细菌细胞对一定量内容物的的泄漏仍然可以保持活力，但细胞内容物的大量流失或关键分子和离子的排出将导致细胞的死亡^[49]。香辛料提取物也作用于嵌入在细胞质膜中的蛋白。比如，一些亲脂烃分子可在脂质双层中积累，扭曲脂质-蛋白的相互作用，或者这

些亲脂化合物直接与蛋白疏水部分相互作用，从而破坏细胞膜蛋白^[50]。另外，香辛料提取物还可能作用于参与能量调节或结构成分合成的酶，如位于细胞质膜中并与脂质分子接壤的 ATP 酶^[51]。其中，肉桂油已被证明可以抑制产气肠杆菌中的氨基酸脱羧酶^[52]。

一般来说，对食品源性微生物具有较强抗菌性能的香辛料提取物常为含有较高比例的酚类化合物^[54]，如胡萝卜酚、丁香酚和百里香酚等。它们主要通过破坏细胞质膜，扰乱质子动力源、电子流动、细胞内容物的主动转运和聚集发挥效能^[55]。单核李斯特菌在百里香精油的作用下就会发生细胞壁增厚和干扰，并伴随着细胞质的减少；在牛至和肉桂提取物作用的大肠杆菌 O157:H7 上也有类似的发现^[56]。就非酚类物质而言，异硫氰酸酯的抗菌活性主要由于二硫键的断裂导致细胞外酶失活。萜类化合物能够破坏和穿透细菌细胞壁的脂质结构，并最终导致细胞死亡^[57]。香芹酚能够分解革兰氏阴性菌的外膜，释放脂多糖，并增强细胞质膜对 ATP 的渗透性；香芹酚对革兰氏阳性细菌的抗菌活性是由于它与细菌细胞膜的相互作用改变了 H⁺和 K⁺等阳离子的渗透性^[58]。烷烃的类型也会影响香辛料提取物的抗菌活性（烯基>烷基），例如柠檬烯比对伞花烃更有抗菌活性^[55]。

2.2 香辛料提取物各成分的协同抑菌作用

当使用香辛料提取物时，普遍认为无论是抗菌活性还是其他的化学反应，都是多种生物活性的化学物质相互交替的协同作用，即组物质的效应大于个体效应的总和。牛至提取物的两种结构相似的主要成分（胡萝卜素和百里香酚），在对金黄色葡萄球菌和铜绿葡萄球菌进行测试时就显示出协同作用^[59]。在肉

桂醛和丁香酚的浓度分别为 250 $\mu\text{g/mL}$ 和 500 $\mu\text{g/mL}$ 的条件下的混合物能有效抑制葡萄球菌、微球菌和大肠杆菌的生长长达 30 d, 而单一化合物却没有抑制作用^[60]。

除同一香辛料中提取的不同化合物有协同作用外, 不同香辛料的提取的化合物之间也能表现出协同效能。将柠檬中的柠檬酸添加到香料中, 可以观察到香料协同抗菌作用。黑胡椒也是一种“生物利用度增强

剂”, 可以增加包括微生物在内的细胞与其他天然抗菌剂作用的速率^[61]。又如在百里香和牛至中发现的主要抗菌化合物是百里香酚和香芹酚。最近在一项使用百里香酚、香芹酚和丁香酚抑制李斯特菌的研究中, 当使用混合物时表现出协同效应, 这三种化合物的三元混合物极大地降低了单个化合物的抑制浓度^[62]。

2.3 香辛料提取物抑菌的体外实验

表 2 香辛料提取物的抗菌活性

Table 2 Antimicrobial activities of spice extracts

香辛料	微生物类型	主要结果	参考文献
丁香	梭状菌	同 90 种植物提取物相比丁香的水提取物显示出最强活性, 其 MIC 值的范围为 0.1%~0.2%。	[77]
牛至	光滑念珠菌	牛至精油对所有分离出的所有光滑念珠菌均有效, 其 MIC 值范围为 0.5~1100 $\mu\text{g/mL}$ 。	[78]
百里香	糖体表面天然真菌群	百里香精油和蜂胶提取物的酵母菌模计数分别减少了 2.45 和 2.05 lg CFU/g	[79]
肉桂	曲霉菌、接骨木镰刀菌、沟腐霉、匍枝根霉	同姜、肉豆蔻和山葵水提取物相比, 肉桂水提取物在 0.05 g/mL 浓度下, 能完全抑制曲霉菌和沟腐霉, 而在 0.10 和 0.15 g/mL 浓度下, 能完全抑制接骨木镰刀菌和匍枝根霉。	[80]
小茴香	1230 种食物样品中分离出来的真菌	小茴香籽精油对大多数真菌具有杀菌作用, 并在 MIC 为 0.6 $\mu\text{L/mL}$ 浓度下, 对除匍枝根霉外的所有 19 种食源性真菌菌株有广谱抗菌作用。	[81]
迷迭香	大肠杆菌、青霉菌、李斯特菌和金黄色葡萄球菌	通过琼脂扩散法和肉汤稀释法, 比较了 7 种天然提取物对的抗菌作用。两种方法的结果均表明, 迷迭香的己烷提取物比乙醇和水提取物具有的更显著抗菌活性, 其 MIC 值范围为 1.25~5.0 mg/mL。	[82]
大蒜	马铃薯坏疽病菌、镰刀菌和立枯丝核菌	7 种香辛料粗提取物对三种玫瑰茄病原菌的抗菌活性进行比较。结果表明, 大蒜冷水提取物 (10%、20%和 30%浓度下) 对这三种真菌都表现出良好的抗菌活性, 大蒜热水提取物表现出最佳的抗菌活性。	[83]
姜	牙龈卟啉单胞菌、髓卟啉单胞菌和中间普式菌	将生姜和五种生姜成分的乙醇和正己烷提取物与三种厌氧革兰氏阴性菌作用进行比较。结果表明, 两种烷基化的姜醇对口腔病原体的生长有显著抑制, MIC 值为 6~30 $\mu\text{g/mL}$, MBC 值为 4~20 $\mu\text{g/mL}$ 。	[84]
罗勒	鸡肠球菌、枯草杆菌、大肠杆菌、志贺氏菌、链球菌、金黄色葡萄球菌、李斯特菌、铜绿杆菌、酿酒酵母菌和白色念珠菌	测定了氯仿、丙酮和甲醇提取物对 10 种细菌和 4 种酵母菌的抗菌活性。甲醇提取物对铜绿芽孢杆菌、志贺氏菌、李斯特菌、金黄色葡萄球菌和两种大肠杆菌有抑制作用, 但氯仿和丙酮提取物没有任何作用。	[85]
山奈	大肠杆菌、伤寒杆菌、李斯特菌、金黄色葡萄球菌	己烷和乙醇山奈提取物对金黄色葡萄球菌和李斯特菌有很强的抗菌活性。对金黄色葡萄球菌 (MIC<0.625 mg/mL); 对李斯特菌 (MIC<6.625 mg/mL, 24 h 和 1.25 mg/mL, 48 h)。	[86]

目前, 防腐剂对食品相关微生物的抗菌活性还没有标准化的评价标准。主要针对抗生素检测的抗菌敏感性检测 NCCLS 标准被改进后主要应用于天然植物提取物抑菌性能的测定^[63]。然而, 实验结果可能受提

取物的提取方法、培养液体积、生长周期、培养基的使用、培养基的 pH 值、培养时间和温度等因素的影响^[64], 各个发表的数据间的比较也十分复杂。其中, 大多数科研人员使用最小抑菌浓度 (minimum

inhibitory concentration, MIC) 作为抑菌剂抗细菌性能的衡量指标^[65]。用于测试香辛料提取物抗菌活性的技术多种多样。如果对提取物进行抗菌活性的筛查, 常见的方法有纸片扩散法, 即将用香辛料提取物浸泡的纸片放置在接种的琼脂板上^[66]。此方法主要用于抗菌活性的初步筛选。当需要筛选大量提取物与或大量细菌分离物时, 琼脂孔测试法亦用作抗菌活性筛选方法之一^[54]。为了使细菌生长更易被观察, 有时在生长培养基中添加三苯四氯化铵^[67]。如果对提取物进行抗菌强度筛查, 可以通过提取物在琼脂或肉汤中的稀释度来确定。在肉汤稀释研究中, 存在许多不同的确定终点的技术, 最常用的方法是光学密度测量法(OD)(浊度测量)和用活菌计数的菌落计数法。如果对提取物杀菌作用的速度或抑菌效应的持续时间进行筛查, 可以通过时间杀灭分析(存活曲线图)来确定, 即添加提取物后肉汤中活细胞数随时间制图。抗菌活性的物理效果如细菌细胞壁的破坏和细胞含量的丢失则可通过扫描电子显微镜(Scanning electron microscopy, SEM)观测。

一些已被证明对微生物具有显著抑制作用的香辛料提取物见表 2, 例如辣椒中提取的辣椒素就具有潜在对抗胃中病原体的功效^[68]; 孜然、姜、香菜、罗勒等香辛料的精油已发现可以不同程度的抑制黑曲霉和酿酒酵母^[69]; 茴香脑和丁香油酚应用于抑制寄生曲霉的生长和毒素的产生^[70]; 大蒜油中二烯基硫化物对绿脓假单胞菌和肺炎杆菌等有体外抗菌活性^[71]。其中最有效抑菌提取物被认为源于百里香、丁香、牛至、迷迭香和鼠尾草, 它们的活性与其精油的组成有关^[72]。体外实验的结果差异较大另一个主要因素是是否使用乳化剂或溶剂来溶解提取物, 以使其在水溶性培养基中稳定, 如吐温-80^[73]、乙醇^[74]、甲醇^[75]、聚乙二醇^[76]等。在琼脂中, 牛至和丁香提取物的 MIC 值明显低于吐温-80 或乙醇存在时。比如吐温-80 被推荐为酚类消毒剂的中和剂, 这已在百里香油对鼠伤寒沙门氏菌的作用中得到证实^[50]。因此, 溶剂和洗涤剂可以降低香辛料提取物的抗菌活性。

3 香辛料提取物在肉制品中的应用

3.1 香辛料提取物在肉制品中的调味、着色、抗氧化和保健作用

大多数香辛料都是烹饪和食物准备中的宝贵原料。在肉制品的应用中, 香辛料植物由于其香气特征, 会产生大量风味化合物, 其提取物最先被作为调味剂使用^[87]。特别受当前对饮食中的盐需求减少的驱使, 食品科研人员通过利用这类辛辣化合物丰富味道, 而减少盐和味精的使用。同时, 因有的香辛料提取物中含有类胡萝卜素、姜黄素、辣椒红素等天然色素, 还具有着色的效果, 代替合成色素的使用^[88]。随着进一步的研究, 香辛料提取物在肉制品中呈现出显著的抗氧化和保健功能。例如胡椒、鼠尾草和百里香等都是天然抗氧化剂的重要来源, 并已通过实验开始在不同的肉制品中使用^[89]。另外, 香辛料提取物除防止食品微生物破坏外, 大多数香料还显示出抗糖尿病、镇痛、抗炎、抗氧化和抗癌特性^[90]。其中在姜黄和迷迭香中发现了天然的抗炎化合物^[91]。对大蒜、鼠尾草、百里香和藏红花的研究表明, 它们可以预防高胆固醇, 对癌症有一定的防护作用, 并改善人体免疫系统^[92]。因此添加安全营养的提取物对于研发更健康的肉制品是一重要途径。随着香辛料提取物健康因子的开发和利用, 相应保健功能的应用也将大大改善肉制品的品质特性^[93]。

3.2 香辛料提取物在肉品中的抗菌作用

3.2.1 各类香辛料提取物在肉品中的抗菌作用

除在调味、着色、抗氧化、保健上发挥功效外, 这些天然植物抗菌特性的发现大大拓展了其应用领域, 尤其是对于肉制品的防腐保鲜成为其最为重要的功能。肉品在正常储存条件下是最容易发生细菌破坏和氧化恶化的食物之一。由于肉和肉制品很容易受到微生物的污染, 从而导致食源性疾病^[94]。比如大肠杆菌 O157:H7 此类的革兰氏阴性病原体可在低温和酸性条件下生长, 导致出血性尿毒症结肠炎^[95]; 嗜水气单胞菌通常在冷藏过程中对肉品有所污染, 将产生细胞毒素、肠毒素、气溶素和溶血素而引发肠胃炎^[96]。存在并参与肉品变质的主要食品源性微生物有大肠杆菌、鼠伤寒沙门氏菌、蜡样芽胞杆菌、金黄色葡萄球菌、李斯特菌等。在肉品中使用抗菌剂的主要目的, 一是延长产品保质期(控制自然破坏过程), 二是提升产品安全(抑制致病微生物的生长)。香辛料提取物作为具有抗菌性能的天然防腐剂变得越来越重要。表 3 列举了各类香辛料提取物在肉品中的抗菌作用。

表3 香辛料提取物的在肉品中的抗菌作用

Table 3 Antimicrobial effects of spice extracts in meat products

香辛料	肉品	浓度	微生物	实验结果	参考文献
大蒜	汉堡	1、2、3 mL/100 g 水提物	金黄色葡萄球菌	不同浓度的大蒜水提取物分别添加到100 g 汉堡样品中, 样品在冰箱中冷藏保存1周和两周, 其微生物计数显著降低, 且添加2、3 mL 提取物更有效。	[97]
迷迭香	鸡肉法兰克福香肠	迷迭香提取物 (250 mg/kg)、薄荷提取物 (62 mg/kg) 和生育酚混合物 (150 mg/kg)	香肠中的微生物	迷迭香提取物、薄荷提取物和生育酚混合物对香肠微生物具有抗菌作用, 其中迷迭香提取物的应用显著抑制了微生物的生长。在含有迷迭香和薄荷的混合物的样品中微生物计数最低, 表明可能存在的协同作用。	[98]
肉桂	鲜羊肉	0.01%, 0.025%, 0.05%和0.5% 肉桂皮油	乳酸菌、大肠杆菌	羊肉中加入0.5%的肉桂皮油后, 在4℃下储存16 d。在储存期间, TVC、乳酸杆菌和大肠杆菌的微生物计数从第4 d至第16 d比对照组减少到0.6至1.9 lg CFU/g。	[99]
芥末	煮熟腌烤的鸡胸肉片	100~250 mg/g 芥末提取物	李斯特菌、乳酸菌	在4℃下, 有酸化卡拉胶涂层 (含有100~250 mg/g 芥末提取物) 和无涂层鸡肉片贮存70 d后, 有涂层的鸡肉片可降低了李斯特菌和需氧菌的生存力7.0 lg CFU/g。	[100]
丁香	生鸡肉	1% V/m 丁香提取物 (95%乙醇)	乳酸菌、大肠杆菌、假单胞菌	在丁香提取物的作用下, 以TVC值等于7.0 lg CFU/g为基准, 生鸡肉的贮存期可由12 d延长至15 d。同无添加的对照组相比, 15 d后乳酸杆菌、大肠杆菌和假单胞菌群的微生物计数分别减少了0.77、0.5、1.29 lg CFU/g。	[101]
鼠尾草	鲜猪肉香肠	0.05、0.075、0.1 μg/g 鼠尾草渣精油和提取物	需氧嗜温性细菌	在8 d冷藏条件下, 添加了鼠尾草渣精油和提取物的鲜猪肉香肠的需氧嗜温性细菌的总数有显著下降。其中在0.075 μg/g和0.1 μg/g 鼠尾草提取物的作用下, 其与对照组相比需氧嗜温性细菌的总数下降了0.94~1.16 lg CFU/g, 且都低于7.0 lg CFU/g。	[102]
百里香	生牛肉	2% V/V 百里香精油	李斯特菌	在7℃温度条件下, 对生牛肉片进行李斯特菌计数, 在96 h后, 同对照组相比, 添加百里香精油的李斯特菌计数显著性降低了1.01 lg CFU/g。	[103]
黑胡椒	生猪肉	0、0.1、0.5% V/V 黑胡椒精油	假单胞菌、大肠杆菌	对于0.1%和0.5%黑胡椒精油处理过的生猪肉, 保质期大约可延缓6 d。在第9 d, 0.5%黑胡椒精油同对照组相比, 其假单胞菌和大肠杆菌计数分别减少了3.05、1.85 lg CFU/g。革兰氏阴性细菌比革兰氏阳性细菌对黑胡椒精油更敏感。	[89]

3.2.2 单一香辛料提取物的应用

丁香酚和香菜、丁香、牛至和百里香油在 5~20 $\mu\text{L/g}$ 水平下, 均可有效抑制肉品中的李斯特菌和嗜水气单胞菌^[104,105]。肉桂、牛至和百里香精油对所有细菌都有很高的抗菌活性, 特别对火腿中李斯特菌混合培养物的生长速率有所控制, 其中在 500 mg/L 牛至和肉桂精油作用下的李斯特菌的生长速率分别降低了 19%和 10%^[106]。迷迭香提取物 VivOX 20 (20%胡萝卜酸含量) 和 VivOX 4 (4%胡萝卜含量) 添加至鸡肉法兰克福香肠中, 在 4 $^{\circ}\text{C}$ 和 12 $^{\circ}\text{C}$ 两个温度条件下, 第 17 d 需氧菌平板计数低于 4 lg CFU/g ($p<0.05$), 第 31 d 其需氧菌平板计数仍然显著低于对照组^[107]。于长青团队研究了肉桂、丁香、迷迭香 3 种香辛料醇提取物对冷却肉的防腐保鲜效果。研究显示添加肉桂、丁香和迷迭香分别在浓度为 2.0 g/L 、2.0 g/L 、2.0 g/L 条件下, 冷却肉在第 21 d 检测时, pH 值小于 6.6, metMb 百分含量未超过 40%, 且细菌总数未超过 5.7, 各项指标均处于鲜肉水平^[8]。Gill 等^[108]也发现火腿肠在香菜精油处理下经过真空包装能有效抑制李斯特菌, 经处理的火腿肠可以在 10 $^{\circ}\text{C}$ 条件下贮藏超过 4 星期以上。Martínez 等^[109]研究了 13 种植物提取物在西班牙辣香肠上保存 50 d 后的抑菌作用, 分别是柠檬、金虎尾、迷迭香、红辣椒、大蒜、牛至、甜菜、莴苣、芝麻菜、菠菜、苜蓿菜、芹菜、豆瓣菜。其中, 1 mg/g 迷迭香提取物显示出 100%的抑菌活性。另外大蒜、红辣椒、牛至同其他一些绿叶蔬菜显示出更明显的抑菌效果, 在 1 mg/g 的浓度下其细菌总数可降低 90%~98%。

3.2.3 复合香辛料提取物的应用

除单一香辛料提取物在肉品中的使用外, 其复配制剂在肉品防腐保鲜中的作用更为显著。在 14 种香辛料提取物对常见的 4 种引发肉类变质和致病细菌 (单核增生李斯特杆菌、大肠杆菌、荧光假单胞菌和乳杆菌) 的抑制作用研究中, 迷迭香和甘草提取物是对抗四种微生物的最佳抑制剂。特别是将迷迭香/甘草提取物混合后喷洒于改良大气包装下的新鲜猪肉和真空包装的火腿切片, 样本在 4 $^{\circ}\text{C}$ 条件下储存 28 d, 其各微生物生长总数均比对照组低^[110]。Weerakkody 等^[111]采用山奈、迷迭和柠檬皮复合提取物, 对熟鲜虾自然呈现腐败进行了研究。该复合物对单核细胞增生李斯特菌和金黄色葡萄球菌均有抑制作用, 同时在 4 $^{\circ}\text{C}$ 下, 山奈、迷迭香和柠檬皮提取物可显著降低需氧菌和乳酸菌的水平, 分别降低 1.6 和 1.59 lg CFU/g ($p<0.05$)。在香辛料提取物复配制剂的生产中, 已有多种商业化产品面市。徐幸莲团队^[112]对苏州闻达公司的复合天然

防腐剂 (主要成分为迷迭香、越橘、葡萄柚、柠檬或苹果提取后的微囊化物等) 进行了研究, 将其与山梨酸钾等进行了比较, 对非烟熏法兰克福香肠在 4 $^{\circ}\text{C}$ 下的贮存, 闻达产品能有效延长产品 4~6 周的货架期。王卫等^[113]对闻达公司系列产品的研究发现, 其应用于酱卤、腌腊肉制品中, 均呈现良好的替代硝酸盐的抑菌、抗氧等作用; 将其 T10、DV、T4N 迷迭香复配提取物同传统抑菌剂亚硝组合进行比较, 在肉汤实验中, 三种复配提取物均对单增李斯特菌显示出更好的抑菌效果, 在鸡肉泥模拟肉品体内接种实验中, 1% DV 和 1% T10+1% DV 效果最佳^[114], T10 和 DV 在中式培根、腌腊鱼应用中亦可呈现良好的产品特性和可替代硝酸盐的抑菌效果^[115,116]。

3.2.4 香辛料提取物的协同抗菌作用

无论香辛料单一提取物或复配制剂的体外抗菌实验表现如何突出, 通常在肉品中均需要添加更大的浓度。一些研究反应出肉制品中香辛料提取物对微生物耐药性的影响, 主要是因为同培养基相比, 食品中肉品的营养物质更加丰富, 可以使细菌能很快的修复受损细胞^[108]。而两种及其多种提取物的复合使用, 显然能通过多靶效应和协同作用, 比单一的提取物发挥最佳的抑菌防腐作用, 当然这一协同效应还取决于肉品的内在特性, 如产品的脂肪/蛋白质/水含量、抗氧化剂、防腐剂、pH 值、盐和其他添加剂, 以及其外部因素, 如温度、气调包装、微生物的特性、压力等, 共同影响食物的防腐保鲜^[117]。一般来说, 香辛料提取物的抗菌作用的敏感性随着肉品的 pH、储存温度和氧气量的降低而增加^[105]。另如, 百里香醇和香芹酚已被证明与高静水压 (high hydrostatic pressure, HHP) 具有协同作用。使用 300 MPa HHP 和 3 mmol/L 百里香醇或香芹酚联合作用, 中指数期李斯特菌细胞的存活数量降低的更多, 这主要是由于 HHP 对细胞膜造成损伤的各靶点协同作用^[118]。

4 结语

肉制品的高脂肪和高胆固醇, 以及加工中添加的化学防腐剂可能存在的安全隐患等引发人们对其食用的一定限制, 而消费者也希望自己食用的产品中的成分更多出自天然, 因此寻找可替代食品抑菌防腐的天然提取物越来越受到关注。香辛料是众多生物活性成分的潜在来源, 这些提取物可作为天然抗氧化剂和抗菌剂, 用以提高肉品质量, 帮助肉类行业满足消费者对肉品健康“绿色”的需求。目前有关香辛料提取物的主要化学活性成分、提取方法、抑菌的机制和协同作用、以及在各类肉品中呈现的显著抗菌作用等已有了

大量的研究, 结果表明天然植物提取物在一定条件下的确可以比合成化合物更有效、更安全。天然香辛料提取物的抑菌性和抗氧化作用机理, 可基于对微生物细胞壁的降解、细胞膜的破坏、膜蛋白的损伤, 或者细胞内容物的泄漏和质子源的消耗等多个靶点, 而多种提取物的复合显然比单一的使用具有更显著的抑菌防腐效果。香辛料提取物在肉品防腐保鲜应用上展现了广阔前景, 未来的研究重点是对新型天然来源的香辛料提取物的开发, 以及通过提取、分离和技术的优化, 提高提取率及其生物活性。在应用上, 与冷链、气调等其他技术结合, 在开发低脂、低钠、货架稳定的新型肉制品外, 更能发挥其抑菌、抗氧化、增香、着色和保健功能, 提高肉品营养和品质^[119]。

参考文献

- [1] Enan G, El-essawy A A, Uyttendaele M, et al. Antibacterial activity of *Lactobacillus plantarum* UG1 isolated from dry sausage: characterization, production and bactericidal action of plantaricin UG1 [J]. International Journal of Food Microbiology, 1996, 30(3): 189-215
- [2] Zamuz S, López-pedrouso M, Barba F, et al. Application of hull, bur and leaf chestnut extracts on the shelf-life of beef patties stored under MAP: evaluation of their impact on physicochemical properties, lipid oxidation, antioxidant, and antimicrobial potential [J]. Food Research International, 2018, 112: 263-273
- [3] 杨轶浠, 王卫, 白婷, 等. 抗氧化天然植物提取物及其在肉品中的应用研究进展[J]. 肉类研究, 2021, 35(1): 74-82
YANG Yixi, WANG Wei, BAI Ting, et al. Recent progress in natural plant extracts with antioxidant activity and their application in meat products [J]. Meat Research, 2021, 35(1): 74-82
- [4] Ferysiuk K, Wójciak K M. Reduction of nitrite in meat products through the application of various plant-based ingredients [J]. Antioxidants, 2020, 9(8): 711-738
- [5] Rencüzoğullari E, İla H B, Kayraldiz A, et al. Chromosome aberrations and sister chromatid exchanges in cultured human lymphocytes treated with sodium metabisulfite, a food preservative [J]. Mutation Research, 2001, 490(2): 107-112
- [6] Hord N G, Tang Y, Bryan N S, et al. Food sources of nitrates and nitrites: the physiologic context for potential health benefits [J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 2009, 90(1): 1-10
- [7] Munekata P E S, Rocchetti G, Pateiro M, et al. Addition of plant extracts to meat and meat products to extend shelf-life and health-promoting attributes: an overview [J]. Current Opinion in Food Science, 2020, 31: 81-87
- [8] 夏秀芳, 孔保华, 于长青. 几种天然香辛料提取物延长冷却肉货架期的研究[J]. 食品与机械, 2008, 24(3): 55-59
XIA Xiufang, KONG Baohua, YU Changqing. Study on extending the shelf-life of chilled meat by several natural spice extracts [J]. Food Machinery, 2008, 24(3): 55-59
- [9] Moure A, Cruz J M, Franco D, et al. Natural antioxidants from residual sources [J]. Food Chemistry, 2001, 72(2): 145-171
- [10] 赵桦萍. 香辛料的产品形态及应用研究进展[J]. 中国调味品, 2018, 43(2): 169-171
ZHAO Huaping. Research progress on product form and application of spices [J]. China Condiment, 2018, 43(2): 169-171
- [11] Huang L, Ho C, Wang Y. Biosynthetic pathways and metabolic engineering of spice flavors [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 5: 1-14
- [12] Viuda-martos M, Ruiz-navajas Y, Fernández-lópez J, et al. Spices as functional foods [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2010, 51(1): 13-28
- [13] Garcia-salas P, Morales-soto A, Segura-carretero A, et al. Phenolic-compound-extraction systems for fruit and vegetable samples [J]. Molecules, 2010, 15(12): 8813-8826
- [14] Zhao C, Yang X, Tian H, et al. An improved method to obtain essential oil, flavonols and proanthocyanidins from fresh *Cinnamomum japonicum* Sieb. leaves using solvent-free microwave-assisted distillation followed by homogenate extraction [J]. Arabian Journal of Chemistry, 2020, 13(1): 2041-2052
- [15] Bousbia N, Vian M A, Ferhat M A, et al. Comparison of two isolation methods for essential oil from rosemary leaves: hydrodistillation and microwave hydrodiffusion and gravity [J]. Food Chemistry, 2009, 114(1): 355-362
- [16] O'shea S K, Riesen D D V, Rossi L L. Isolation and analysis of essential oils from spices [J]. Journal of Chemical Education, 2012, 89(5): 665-668
- [17] Tayade A B, Dhar P, Sharma M, et al. Antioxidant capacities, phenolic contents, and GC/MS analysis of *Rhodiola imbricata* Edgew. root extracts from trans-himalays [J]. Journal of Food Science, 2013, 78(3): 402-410
- [18] Gu F, Wu G, Fang Y, et al. Nontargeted metabolomics for phenolic and polyhydroxy compounds profile of pepper (*Piper nigrum* L.) products based on LC-MS/MS analysis [J]. Molecules, 2018, 23(8): 1985-1995

- [19] 刘金敏,江汉美,田宇.HS-SPME-GC-MS 分析五种姜科香辛料的挥发性成分[J].中国调味品,2021,46(4):141-147
LIU Jinmin, JIANG Hanmei, TIAN Yu. Analysis of volatile components in five ginger spices by HS-SPME-GC-MS [J]. China Condiment, 2021, 46(4): 141-147
- [20] Huhtanen C N. Inhibition of *Clostridium botulinum* by spice extracts and aliphatic alcohols [J]. Journal of Food Protection, 1980, 43(3): 195-196
- [21] Marino M, Bersani C, Comi G. Antimicrobial activity of the essential oils of *Thymus Őulgaris* L. measured using a bioimpedometric method [J]. Journal of Food Protection, 1999, 62(9): 1017-1023
- [22] Tassou C C, Drosinos E H, Nychas G J. Effect of essential oil from mint (*Mentha piperita*) on *Salmonella enteritidis* and *Listeria monocytogenes* in model food system at 4 and 10 °C [J]. Journal of Applied Microbiology, 1995, 78(6): 593-600
- [23] Beuchat L R. Sensitivity of *Vibrio parahaemolyticus* to spices and organic acids [J]. Journal of Food Science, 1976, 41(4): 899-902
- [24] Sivropoulou A, Papanikolaou E, Nikolaou C, et al. Antimicrobial and cytotoxic activities of *Origanum* essential oils [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1996, 44(5): 1202-1205
- [25] Skandamis P N, Nychas G J. Development and evaluation of a model predicting the survival of *Escherichia coli* O157:H7 NCTC 12900 in homemade eggplant salad at various temperatures, pHs, and oregano essential oil concentrations [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2000, 66(4): 1646-1653
- [26] Arraiza M P, Andres M P, Arrabal C, et al. Seasonal variation of essential oil yield and composition of thyme (*Thymus vulgaris* L.) grown in Castilla-La Mancha (central Spain) [J]. The Journal of Essential Oil Research, 2009, 21(4): 360-362
- [27] Marino M, Bersani C, Comi G. Impedance measurements to study the antimicrobial activity of essential oils from *Lamiaceae* and *Compositae* [J]. International Journal of Food Microbiology, 2001, 67(3): 187-195
- [28] Delaquis P, Stanich K, Girard B, et al. Antimicrobial activity of individual and mixed fractions of dill, cilantro, coriander and eucalyptus essential oils [J]. International Journal of Food Microbiology, 2002, 74(1-2): 101-109
- [29] Senatore F. Influence of harvesting time on yield and composition of the essential oil of a Thyme (*Thymus pulegioides* L.) growing wild in Campania (Southern Italy) [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1996, 44(5): 1327-1332
- [30] Surburg H, Panten J. Common Fragrance and Flavor Materials: Preparation, Properties and Uses [M]. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2016: 265-266
- [31] Tiwari B K, Valdramidis V P, O'donnell C P, et al. Application of natural antimicrobials for food preservation [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(14): 5987-6000
- [32] Cosentino S, Tuberoso C I G, Pisano B, et al. *In-vitro* antimicrobial activity and chemical composition of Sardinian thymus essential oils [J]. Letters in Applied Microbiology, 1999, 29(2): 130-135
- [33] Cowan M M. Plant products as antimicrobial agents [J]. Clinical Microbiology reviews, 1999, 12(4): 564-582
- [34] Shan B, Cai Y, Sun M, et al. Antioxidant capacity of 26 spice extracts and characterization of their phenolic constituents [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(20): 7749-7759
- [35] Paster N, Menasherov M, Ravid U, et al. Antifungal activity of oregano and thyme essential oils applied as fumigants against fungi attacking stored grain [J]. Journal of Food Protection, 1995, 58(1): 81-85
- [36] Wang Y, Li R, Jiang Z, et al. Green and solvent-free simultaneous ultrasonic-microwave assisted extraction of essential oil from white and black peppers [J]. Industrial Crops and Products, 2018, 114(4): 164-172
- [37] Kokkini S, Karousou R, Dardioti A, et al. Autumn essential oils of Greek oregano [J]. Phytochemistry, 1997, 44(5): 883-886
- [38] Masahiro T, Kenji O, Kazuhiro C, et al. Antiviral diterpenes from *Salvia officinalis* [J]. Phytochemistry, 1994, 35(2): 539-541
- [39] Lens-lisbonne, Cremieux A, Maillard C, et al. Methods for evaluation of antibacterial activity of essential oils: application to essences of thyme and cinnamon [J]. Journal de Pharmacie de Belgique, 1987, 42(5): 297-302
- [40] Karna P, Chagani S, Gundala S R, et al. Benefits of whole ginger extract in prostate cancer [J]. British Journal of Nutrition, 2012, 107(4): 473-484
- [41] Zhang Z, Wang C, Wen X, et al. Role of saffron and its constituents on cancer chemoprevention [J]. Pharmaceutical Biology, 2013, 51(7): 920-924
- [42] Daferera D J, Ziogas B M, Polissiou M G. GC-MS analysis of essential oils from some Greek aromatic plants and their fungitoxicity on *Penicillium digitatum* [J]. Journal of

- Agricultural and food chemistry, 2000, 48(6): 2576-2581
- [43] Harris J C, Cottrell S, Plummer S, et al. Antimicrobial properties of *Allium sativum* (garlic) [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2001, 57(3): 282-286
- [44] Azzouz M A, Bullerman L B. Comparative antimycotic effects of selected herbs, spices, plant components and commercial antifungal agents [J]. Journal of Food Protection, 1982, 45(14): 1298-1301
- [45] Burt S. Essential oils: their antibacterial properties and potential applications in foods - a review [J]. International Journal of Food Microbiology, 2004, 94(3): 223-253
- [46] Carson C F, Mee B J, Riley T V. Mechanism of action of *Melaleuca alternifolia* (tea tree) oil on *Staphylococcus aureus* determined by time-kill, lysis, leakage, and salt tolerance assays and electron microscopy [J]. Antimicrobial Agents and Chemotherapy, 2002, 46(6): 1914-1920
- [47] Sikkema J, De Bont J, Poolman B. Interactions of cyclic hydrocarbons with biological membranes [J]. The Journal of Biological Chemistry, 1994, 269(11): 8022-9028
- [48] Oosterhaven K, Poolman B, Smid E J, et al. S-carvone as a natural potato sprout inhibiting, fungistatic and bacteriostatic compound [J]. Industrial Crops and Products, 1995, 4(1): 23-31
- [49] Johnston M D, Hanlon G W, Denyer S P, et al. Membrane damage to bacteria caused by single and combined biocides [J]. Journal of Applied Microbiology, 2010, 94(6): 1015-1023
- [50] Juven B J, Kanner J, Schved F, et al. Factors that interact with the antibacterial action of thyme essential oil and its active constituents [J]. Journal of Applied Bacteriology, 1994, 76(6): 626-631
- [51] Conner D E, Beuchat L R. Effect of essential oils from plants on growth of food spoilage yeasts [J]. Journal of Food Science, 1984, 49(2): 429-434
- [52] Wendakoon C N, Sakaguchi M. Inhibition of amino acid decarboxylase activity of *Enterobacter aerogenes* by active components in spices [J]. Journal of Food Protection, 1995, 58(3): 280-283
- [53] Tongnuanchan R, Benjakul S. Essential oils: extraction, bioactivities, and their uses for food preservation [J]. Journal of Food Science, 2014, 79(7): 1231-1249
- [54] Dorman H J D, Deans S G. Antimicrobial agents from plants: antibacterial activity of plant volatile oils [J]. Journal of Applied Microbiology, 2000, 88(2): 308-316
- [55] Sikkema J, De Bont J A, Poolman B. Mechanisms of membrane toxicity of hydrocarbons [J]. Microbiological Reviews, 1995, 59(2): 201-222
- [56] Fisher K, Phillips C. Potential antimicrobial uses of essential oils in foods: is citrus the answer? [J]. Trends in Food Science and Technology, 2008, 19(3): 156-164
- [57] Holly R A, Patel D. Improvement in shelf-life and safety of perishable foods by plant essential oils and smoke antimicrobials [J]. Food Microbiology, 2005, 22(4): 273-292
- [58] Tongnuanchan P, Benjakul S. Essential oils: extraction, bioactivities, and their uses for food preservation [J]. Journal of Food Science, 2014, 79(7): 1231-1249
- [59] Lambert R J, Skandamis P N, Coote P J, et al. A study of the minimum inhibitory concentration and mode of action of oregano essential oil, thymol and carvacrol [J]. Journal of Applied Microbiology, 2001, 91(3): 453-462
- [60] Moleyar V, Narasimham P. Antibacterial activity of essential oil components [J]. International Journal of Food Microbiology, 1992, 16(4): 337-342
- [61] Johri R K, Zutshi U. An ayurvedic formulation 'Trikatu' and its constituents [J]. Journal of Ethnopharmacology, 1992, 37(2): 85-91
- [62] García-garcía R, López-malo A, Palou E. Bactericidal action of binary and ternary mixtures of carvacrol, thymol, and eugenol against *Listeria innocua* [J]. Journal of Food Science, 2011, 76(2): M95-M100
- [63] Hammer K A, Carson C F, Riley T V. Antimicrobial activity of essential oils and other plant extracts [J]. Journal of Applied Microbiology, 1999, 86(6): 985-990
- [64] Rios J L, Recio M C, Villar A. Screening methods for natural products with antimicrobial activity: a review of the literature [J]. Journal of Ethnopharmacology, 1988, 23(2-3): 127-149
- [65] Janssen A M, Scheffer J J, Svendsen A B. Antimicrobial activity of essential oils: a 1976-1986 literature review. Aspects of the test methods [J]. Planta Medica, 1987, 53(5): 395-398
- [66] Farag R S, Daw Z Y, Hewedi F M, et al. Antimicrobial activity of some Egyptian spice essential oils [J]. Journal of Food Protection, 1989, 52(9): 665-667
- [67] Elgayyar M, Draughon F A, Golden D A, et al. Antimicrobial activity of essential oils from plants against selected pathogenic and saprophytic microorganisms [J]. Journal of Food Protection, 2001, 64(7): 1019-1024
- [68] Jones N L, Souheil S, Sherman P M. Capsaicin as an inhibitor of the growth of the gastric pathogen *Helicobacter pylori* [J]. Fems Microbiology Letters, 1997, 146(2): 223-227
- [69] Joshi V K, Sharma R, Kumar V. Antimicrobial activity of

- essential oils: a review [J]. Journal of Essential Oil Research, 2015, 26(1): 34-40
- [70] Karapinar M. Inhibitory effects of anethole and eugenol on the growth and toxin production of *Aspergillus parasiticus* [J]. International Journal of Food, 1990, 10(3-4): 193-199
- [71] Tsao S, Yin M. *In vitro* activity of garlic oil and four diallyl sulphides against antibiotic-resistant *Pseudomonas aeruginosa* and *Klebsiella pneumoniae* [J]. The Journal of Antimicrobial Chemotherapy, 2001, 47(5): 665-670
- [72] Shelef L A. Antimicrobial effects of spices [J]. Food Safety, 1984, 6(1): 29-44
- [73] Paster N, Juven B J, Shaaya E, et al. Inhibitory effect of oregano and thyme essential oils on moulds and foodborne bacteria [J]. Letters in Applied Microbiology, 1990, 11(1): 33-37
- [74] Deans S G, Ritchie G. Antibacterial properties of plant essential oils [J]. International Journal of Food Microbiology, 1987, 5(2): 165-180
- [75] Onawunmi G O. Evaluation of the antimicrobial activity of citral [J]. Letters in Applied Microbiology, 1989, 9(3): 105-108
- [76] Pintore G, Usai M, Bradesi P, et al. Chemical composition and antimicrobial activity of *Rosmarinus officinalis* L. oils from Sardinia and Corsica [J]. Flavour and Fragrance Journal, 2002, 17(1): 15-19
- [77] Cui H, Gabriel A A, Nakano H. Antimicrobial efficacies of plant extracts and sodium nitrite against *Clostridium botulinum* [J]. Food Control, 2010, 21(7): 1030-1036
- [78] Khosravi A R, Shokri H, Kermani S, et al. Antifungal properties of *Artemisia sieberi* and *Origanum vulgare* essential oils against *Candida glabrata* isolates obtained from patients with vulvovaginal candidiasis [J]. Journal De Mycologie Médicale, 2011, 21(2): 93-99
- [79] Ozturk I. Antifungal activity of propolis, thyme essential oil and hydrosol on natural mycobiota of sucuk, a Turkish fermented sausage: monitoring of their effects on microbiological, color and aroma properties: antifungal activity of propolis and essential oil [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2015, 39(6): 1148-1158
- [80] Mvuemba H N, Green S E, Tsopmo A, et al. Antimicrobial efficacy of cinnamon, ginger, horseradish and nutmeg extracts against spoilage pathogens [J]. Phytoprotection, 2009, 90(2): 65-70
- [81] Kedia A, Prakash B, Mishra P K, et al. Antifungal and antiaflatoxic properties of *Cuminum cyminum* (L.) seed essential oil and its efficacy as a preservative in stored commodities [J]. International Journal of Food Microbiology, 2014, 168: 1-7
- [82] Weerakkody N S, Caffin N, Turner M S, et al. *In vitro* antimicrobial activity of less-utilized spice and herb extracts against selected food-borne bacteria [J]. Food Control, 2010, 21(10): 1408-1414
- [83] Toubia E P, Zakaria M, Tahereh E K, et al. Anti-fungal activity of cold and hot water extracts of spices against fungal pathogens of roselle (*Hibiscus sabdariffa*) *in vitro* [J]. Microbial Pathogenesis, 2012, 52(2): 125-129
- [84] Park M, Bae J, Lee D S. Antibacterial activity of [10]-gingerol and [12]-gingerol isolated from ginger rhizome against periodontal bacteria [J]. Phytotherapy Research, 2008, 22(11): 1446-1449
- [85] Kaya I, Yigit N, Benli M N. Antimicrobial activity of various extracts of *Ocimum basilicum* L. and observation of the inhibition effect on bacterial cells by use of scanning electron microscopy [J]. African Journal of Traditional, Complementary, and Alternative Medicines, 2008, 5(4): 363-369
- [86] Weerakkody N S, Caffin N, Turner M S, et al. *In vitro* antimicrobial activity of less-utilized spice and herb extracts against selected food-borne bacteria [J]. Food Control, 2010, 21(10): 1408-1414
- [87] Koeduka T. Functional evolution of biosynthetic enzymes that produce plant volatiles [J]. Bioscience, Biotechnology and Biochemistry, 2018, 82(2): 192-199
- [88] 李芳,李洪军,李少博,等.天然香辛料的功能及其在肉与肉制品中的应用研究现状[J].食品与发酵工业,2020,46(20): 274-281
- LI Fang, LI Hongjun, LI Shaobo, et al. The functional properties of natural spices and their application in meat and meat product [J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(20): 274-281
- [89] Zhang J, Wang Y, Pan D, et al. Effect of black pepper essential oil on the quality of fresh pork during storage [J]. Meat Science, 2016, 117: 130-136
- [90] Curtis O F, Shetty K, Cassagnol G, et al. Comparison of the inhibitory and lethal effects of synthetic versions of plant metabolites (anethole, eugenol, carvacrol, thymol) on a food spoilage yeast (*Debaromyces hansenii*) [J]. Food Biotechnology, 1996, 10(1): 55-73
- [91] Wargovich M J, Woods C, Hollis D, et al. Herbals, cancer prevention and health [J]. The Journal of Nutrition, 2001,

- 131(11): 3034-3036
- [92] Craig W J. Health-promoting properties of common herbs [J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 1999, 70(3): 491-499
- [93] Hygreeva D, Pandey M C, Radhakrishna K. Potential applications of plant based derivatives as fat replacers, antioxidants and antimicrobials in fresh and processed meat products [J]. Meat Science, 2014, 98(1): 47-57
- [94] Delaquis P J, Ward S M, Holley R A, et al. Microbiological, chemical and sensory properties of pre-cooked roast beef preserved with horseradish essential oil [J]. Journal of Food Science, 1999, 64(3): 519-524
- [95] Doyle M P, Schoeni J L. Survival and growth characteristics of *Escherichia coli* associated with hemorrhagic colitis [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1984, 48(4): 855-856
- [96] Hao Y, Brackett R E, Doyle M P. Inhibition of *Listeria monocytogenes* and *Aeromonas hydrophila* by plant extracts in refrigerated cooked beef [J]. Journal of Food Protection, 1998, 61(3): 307-312
- [97] Mozaffari N, Amir S, Shabani S, et al. Antibacterial effect of garlic aqueous extract on *Staphylococcus aureus* in hamburger [J]. Jundishapur Journal of Microbiology, 2014, 7(11): e13134-e13134
- [98] Azizkhani M, Tooryan F. Antioxidant and antimicrobial activities of rosemary extract, mint extract and mixture of tocopherols in beef sausage during storage at 4 °C: antioxidant and antimicrobial effects of EOs [J]. Journal of Food Safety, 2015, 35(1): 128-136
- [99] Hussain Z, Li X, Zhang D, et al. Influence of adding cinnamon bark oil on meat quality of ground lamb during storage at 4 °C [J]. Meat Science, 2021, 171(4): 108269-108276
- [100] Olaimat A N, Holley R A. Inhibition of *Listeria monocytogenes* on cooked cured chicken breasts by acidified coating containing allyl isothiocyanate or deodorized Oriental mustard extract [J]. Food Microbiology, 2016, 57: 90-95
- [101] Zhang H, Wu J, Guo X. Effect of antimicrobial and antioxidant activities of spice extracts on raw chicken meat quality [J]. Food Science and Human Wellness, 2016, 5(1): 39-48
- [102] 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]. Food Science and Technology, 2018, 89(1): 749-755
- [103] Oliveira M M M, Brugnara D F, Piccoli R H. Essential oils of thyme and rosemary in the control of *Listeria monocytogenes* in raw beef [J]. Brazilian Journal of Microbiology, 2013, 44(4): 1181-1188
- [104] Stecchini M L, Sarais I, Giavedoni P. Effect of essential oils on *Aeromonas hydrophila* in a culture medium and in cooked pork [J]. Journal of Food Protection, 1993, 56(5): 406-409
- [105] Tsigarida E, Skandamis P, Nychas G J. Behaviour of *Listeria monocytogene* and autochthonous flora on meat stored under aerobic, vacuum and modified atmosphere packaging conditions with or without the presence of oregano essential oil at 5 °C [J]. Journal of Applied Microbiology, 2000, 89(6): 901-909
- [106] Dussault D, Vu K D, Lacroix M. *In vitro* evaluation of antimicrobial activities of various essential oils, oleoresin and pure compounds against food pathogens and application in ham [J]. Meat Science, 2014, 96(1): 514-520
- [107] Rižnar K, Čelan S, Knez Z, et al. Antioxidant and antimicrobial activity of rosemary extract in chicken frankfurters [J]. Journal of Food Science, 2006, 71(9): 425-429
- [108] Gill A O, Delaquis P, Russo P, et al. Evaluation of antilisterial action of cilantro oil on vacuum packed ham [J]. International Journal of Food Microbiology, 2002, 73(1): 83-92
- [109] Martínez L, Bastida P, Castillo J, et al. Green alternatives to synthetic antioxidants, antimicrobials, nitrates, and nitrites in clean label Spanish chorizo [J]. Antioxidants, 2019, 8(6): 184-201
- [110] Zhang H, Kong B, Xiong Y, et al. Antimicrobial activities of spice extracts against pathogenic and spoilage bacteria in modified atmosphere packaged fresh pork and vacuum packaged ham slices stored at 4 °C [J]. Meat Science, 2009, 81(4): 686-692
- [111] Weerakkody N S, Caffin N, Dykes G A, et al. Effect of antimicrobial spice and herb extract combinations on *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus*, and spoilage microflora growth on cooked ready-to-eat vacuum-packaged shrimp [J]. Journal of Food Protection, 2011, 74(7): 1119-1125
- [112] 禹迎迎,金鑫,郝远,等.新型天然植物防腐剂在延长低温肉制品货架期中的应用[J].食品工业科技,2013,34(7):340-343
- YU Yingying, JIN Xin, XI Yuan, et al. Application of a new antimicrobial plant extracts on prolonging shelf life of

- pasteurized meat products [J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(7): 340-343
- [113] 何丹,王卫,吉莉莉,等.天然植物提取物对传统腌腊及酱卤肉制品特性的影响[J].肉类研究,2019,33(11):18-23
HE Dan, WANG Wei, JI Lili, et al. Effect of natural plant extracts on quality characteristics of traditional cured or sauced meat products [J]. Meat Research, 2019, 33(11): 18-23
- [114] 王卫,熊纬,孙然然,等.天然植物提取物对肉制品中单增李斯特菌的抑制研究[J].食品科技,2018,43(12):272-277
WANG Wei, XIONG Wei, SUN Ranran, et al. Inhibitory effect of natural plant extracts on the growth of *Listeria monocytogenes* in meat product [J]. Food Science and Technology, 2018, 43(12): 272-277
- [115] 何丹,王卫,黄本婷,等.天然植物提取物替代硝酸盐加工中式培根及其产品特性分析[J].成都大学学报(自然科学版),2019,38(2):142-145
HE Dan, WANG Wei, HUANG Benting, et al. Analysis of characteristics of Chinese bacon processed by adding natural
- plant extracts as nitrate substitution [J]. Journal of Chengdu University (Special Science), 2019, 38(2): 142-145
- [116] 王卫,余静,张佳敏,等.天然植物提取物替代硝酸盐对腌腊鱼产品特性的影响[J].成都大学学报(自然科学版),2019,38(4): 375-378
WANG Wei, YU Jing, ZHANG Jiamin, et al. Effect of replacement of nitrate by natural plant extracts on product characteristics of cured fish [J]. Journal of Chengdu University (Special Science), 2019, 38(4): 375-378
- [117] Gould G W. Industry perspectives on the use of natural antimicrobials and inhibitors for food applications [J]. Journal of Food Protection, 1996, 59(13): 82-86
- [118] Karatzas A K, Kets E P, Smid E J, et al. The combined action of carvacrol and high hydrostatic pressure on *Listeria monocytogenes* Scott A [J]. Journal of Applied Microbiology, 2001, 90(3): 463-469
- [119] Decker E A, Park Y. Healthier meat products as functional foods [J]. Meat Science, 2010, 86(1): 49-55

(上接第 151 页)

- [40] 吕彤,林俊杰,周昌瑜,等.热处理强度对猪肉肌球蛋白结构及风味成分吸附特性的影响[J].农业工程学报,2016,32(8): 285-291
LYU Tong, LIN Junjie, ZHOU Changyu, et al. Effect of heat treatment intensity on structure and binding capacity of volatile compounds of myosin [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(8): 285-291
- [41] 李锐,孙祖莉,杨贤庆,等.加热方式对罗非鱼片质构特性和蛋白质理化特性的影响[J].大连海洋大学学报,2020,35(4): 577-583
LI Rui, SUN Zuli, YANG Xianqing, et al. Effects of heating methods on texture and protein physicochemical properties of *Nile tilapia* fillets [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2020, 35(4): 577-583
- [42] 汤凤雨.可常温保藏即食糖醋鲤鱼食品的加工工艺研究[D].无锡:江南大学,2013
TANG Fengyu. Study on process and technology of ready-to-eat sweet and sour carp with long shelf life at ambient temperature [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013

(上接第 306 页)

- [24] Wang L, Shan Y, Gu X, et al. Assembly and photocatalysis of three novel metal-organic frameworks tuned by metal polymeric motifs [J]. Journal of Coordination Chemistry, 2015, 68(11): 2014-2028
- [25] Liu X, Qi W, Wang Y, et al. Rational design of mimic multienzyme systems in hierarchically porous biomimetic metal-organic frameworks [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(39): 33407-33415
- [26] Wang L, Zhi W J, Lian D S, et al. HRP@ZIF-8/DNA hybrids: functionality integration of ZIF-8 via biomineralization and surface absorption [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2019, 7(17): 14611-14620
- [27] Xu W Q, Jiao L, Wu Y, et al. Metal-organic frameworks enhance biomimetic cascade catalysis for biosensing [J]. Advanced Materials, 2021, 33(22): 2005172
- [28] Nadar S S, Rathod V K. Immobilization of proline activated lipase within metal organic framework (MOF) [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 152: 1108-1112
- [29] Kolosova A Y, Shim W-B, Yang Z-Y, et al. Direct competitive ELISA based on a monoclonal antibody for detection of aflatoxin B₁. Stabilization of ELISA kit components and application to grain samples [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2006, 384(1): 286-294

