核农学报 2021,35(5):1170~1177
Journal of Nuclear Agricultural Sciences

文章编号:1000-8551(2021)05-1170-08

植物精油在食品防霉保质中应用的研究进展

王 龑[1] 林 威[1] 俞根荣[2] 孙培龙[1,*]

([1] 浙江工业大学食品科学与工程学院, 浙江 杭州 310014; [2]杭州梅园食品有限公司,浙江 杭州 311106)

摘 要:食品在保藏、运输过程中,极易受到微生物污染而引起腐败变质,亟需有效的抑菌防腐措施。植物精油作为天然抑菌剂,具有易挥发、可降解、低残留、低毒性、环境友好的特点,已成为食品行业研究开发的热点。本文综述了植物精油的来源和活性成分、抑制真菌生长、抑制真菌毒素产生及其在食品保藏中的应用现状,以期为进一步开发与利用植物精油作为天然抑菌剂和食品保鲜剂提供参考。

关键词:植物精油;抑菌;真菌;真菌毒素;食品保藏

DOI:10. 11869/j.issn.100-8551. 2021. 05. 1170

食品在加工和保藏过程中,易受温度、湿度、光照和微生物等多种因素影响,尤其是谷物和果蔬,极易受曲霉属(*Aspergillus*)、青霉属(*Penicillium*)和链格孢霉属(*Alternaria*)等真菌的污染而引起腐败变质,被污染的谷物和果蔬品质变差、营养价值下降,且真菌产生的毒素会对人类健康产生威胁。目前,由真菌污染导致的食品腐败变质问题已经引起全世界的关注[1]。据联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations,FAO)统计,全球每年有25%的农产品受到真菌毒素污染。在我国,由于农户个体种植和贮藏方式的影响,农产品受真菌毒素污染情况严重,尤其在长江流域和华南等高温高湿地区,真菌毒素更易引起严重危害。

真菌毒素是真菌产生的次生代谢产物,主要包括黄曲霉毒素、镰刀菌毒素、赭曲霉毒素等。真菌毒素具有"三致作用",即致畸、致癌、致细胞突变,还具有肝毒性、肾毒性、神经毒性等,其中黄曲霉毒素、赭曲霉毒素和脱氧雪腐镰刀菌烯醇等,均被FAO和世界卫生组织(World Health Organization,WHO)列为自然发生的最危险的食品污染物。据中国真菌毒素网(http://www.mycotoxins.cn/)统计,每年真菌污染粮食谷物至少25 000 t,主要包括小麦、玉米、大米和花生。然而受真菌污染的不只局限于谷物,亦有干果、水果、中药材、牛奶和酒类等。

为了保证食品的营养品质与质量安全,必须采取措施控制食品中的霉菌污染。常用的食品保藏方法有热处理、冷藏、超声处理、紫外线处理、辐照、气调包装、脉冲电场、振荡磁场、化学合成抑菌剂、天然抑菌剂(香料、植物精油、壳聚糖、细菌素)等[2]。热处理易影响食物的营养功效和味道,冷藏不能杀灭微生物,超声处理和紫外线一般仅适用于果汁等液体食品[3]。化学合成抑菌剂在食品保藏中应用广泛,但其会诱导菌种产生抗性,且不易降解,造成环境污染,并在农产品中有着显著残留,危害人类健康,据报道,大约60%的化学合成抑菌剂具有致癌风险[4]。天然抑菌剂往往能在改善食品品质的同时,不产生或不残留危害食品和环境的物质[2]。因此,寻找天然抑菌剂并用其代替化学合成抑菌剂成为了当今研究的热点。植物精油具有特殊的芳香气味,可以作为香精用于食品[5]。植物精油具有抑菌、除虫和抗氧化作用[6],作为一种天然无毒抑菌剂,可用于农产品,尤其是果蔬和谷物,起到防霉保鲜的作用[1]。相较于化学合成抑菌剂,植物精油具有易挥发、可降解、低残留、低毒性的特点,是一种理想的天然抑菌剂,已成为食品行业研究开发的热点[5]。

本文主要概述了植物精油的来源和活性成分、抑制真菌生长、抑制真菌毒素产生及其在食品保藏中的应用现状等方面的研究进展,以期为进一步开发与利用天然绿色抑菌剂提供参考。

收稿日期:2020-01-03 **接受日期**:2020-03-03

基金项目:国家自然科学基金青年项目(31601577),中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2019),功能主食创制与慢性病营养干预北京市重点实验室开放课题(2019)

作者简介:王龑,女,副教授,主要从事食品营养与安全、真菌毒素形成与防控研究。E-mail:wangyan062006@ zjut.edu.cn

[*] **通讯作者**:孙培龙,男,教授,主要从事食品功能因子与营养健康研究。E-mail:sun_pl@ zjut.edu.cn

1　植物精油概述

植物精油又称为挥发油、香精油，是芳香植物次生代谢产物，油状液体、不溶于水、有香味、相对分子量小、且具有一定的生物活性[5]。《本草纲目》列出了 56 种芳香类植物，而对芳香植物油的提取应用可追溯到 13 世纪，目前，已经有大约 300 种精油在香精市场上表现出重要的商业价值[2]。在我国，丁香叶油、罗勒油、八角茴香油、山苍子油、白兰花油、白柠檬油、肉豆蔻油、佛手油等，以及精油的活性成分肉桂醛、柠檬醛、大茴香醛、香叶醇、香茅醇、橙花醇、丁香酚、百里香酚、香芹酚、薄荷酮等已被列入允许使用的食品天然香料名单[7]。

精油广泛存在于植物中，其中，樟科、桃金娘科、芸香科、唇形科、伞形科、姜科等植物中含有丰富的植物精油（表 1）。精油随植物种类的不同在植物体内分布存在差异，在花、果、根、茎、叶中，其含量不同，并且精油的主要成分也有很大差异，甚至同一部位采集的精油成分也随季节、年龄、气候变化而变化[4]。

表 1　富含精油的植物

Table 1　Plants rich in essential oils

来源科属 Source family	植物名称 Plant name	来源科属 Source family	植物名称 Plant name
樟科 Lauraceae	肉桂、月桂、山苍子、香樟树	桃金娘科 Myrtaceae	丁香、桉树、香桃木
红豆杉科 Taxaeeae	香榧	芸香科 Rutaceae	佛手、柠檬、柑橘、花椒
蔷薇科 Rosaceae	琵琶、木香花	唇形科 Labiatae	薰衣草、薄荷、迷迭香、百里香、牛至
木兰科 Magnoliaceae	八角、白兰花叶	胡椒科 Piperaceae	黑胡椒
松科 Pinaceae	马尾松	柏科 Cupressaceae	香柏、砂地柏
百合科 Liliaceae	蒜	禾本科 Gramineae	香茅
菊科 Compositae	藿香蓟、艾草	伞形科 Umbelliferae	当归、蛇床、茴香、孜然
冬青科 Aquifoliaceae	冬青	蓼科 Polygonaceae	大黄
肉豆蔻科 Myristicaceae	肉豆蔻	毛茛科 Ranunculaceae	黄连
紫草科 Boraginaceae	紫草	茄科 Solanaceae	辣椒
姜科 Zingberaceae	高良姜、草果、生姜、姜黄	十字花科 Cruciferae	芥菜

植物精油的组成成分复杂，通常一种植物精油含有几十至上百种的化学成分，然而其主要成分往往只有一种或几种[1]。植物精油的化学成分主要是萜烯类与芳香族类化合物。萜烯类物质主要包括柠檬烯、松油烯、香叶醇、薄荷醇、香茅醇、香芹酮、百里香酚、香芹酚、乙酸丁香酚酯、香叶醛、橙花醛、桉叶油素等；芳香族类物质主要包括肉桂醛、肉桂醇、丁香酚、草蒿脑等[2]。已有不少研究表明，植物精油的主要成分决定其生物活性，次要成分可能具有协同增效的作用[3]。

2　植物精油抑制产毒真菌的生长

2.1　植物精油抑制产毒真菌的生长

植物精油具有显著而广泛的抑菌作用，已经有大量研究报道了对真菌生长有较好抑制效果的植物精油，兼具杀菌、防腐等作用。袁萍等[8]研究了肉桂精油、山苍子精油、丁香精油对黄曲霉的抑制作用，发现这 3 种精油抑制真菌生长的效果明显优于化学合成抑菌剂苯甲酸钠，表明植物精油对真菌生长的抑制效果不亚于化学抑菌剂，具有良好的抑菌潜力。邱实等[9]采用熏蒸法和滤纸片法研究了肉桂精油对莲子中黄曲霉毒素的抑制作用，滤纸片法下 2 $\mu L \cdot mL^{-1}$ 的肉桂精油可抑制黄曲霉生长，熏蒸方法下 1.5 $\mu L \cdot mL^{-1}$ 肉桂精油可抑制黄曲霉毒素的积累。莫小路等[10]研究发现，香茅、广藿香、大叶桉和蛇床精油对串珠镰刀菌和玉米弯孢霉菌具有抑制作用，且随着 4 种精油浓度增加，抑制真菌生长的效果显著提高；李凤清[11]研究了草果精油、豆蔻精油、生姜精油、孜然精油、八角精油、薄荷精油、黑胡椒精油、小茴香精油对青霉、黑曲霉的抑制作用，发现植物精油抑制真菌生长的效果表现出浓度依赖性。不同品种精油抑制真菌生长的效果不同，马萱等[12]研究了甜薰衣草、苏格兰薄荷、阔叶迷迭香、百里香精油对黑曲霉的抑制作用，发现这 4 种精油

对黑曲霉均有显著的抑制作用,最低抑菌浓度(minimal inhibitory concentration, MIC)分别为 100、25、200 和 6.25 μL·mL^{-1},其中百里香精油的抑菌作用最强。表 2 列出了目前已报道的对常见产毒真菌具有抑制效果的植物精油。

表 2 对常见产毒真菌有抑制效果的植物精油

Table 2 Essential oils with fungal inhibitory effect

真菌 Fungi	植物精油 Plant essential oils
黄曲霉 *Aspergillus flavus*	肉桂、山苍子、丁香、小茴香、薄荷、百里香
赭曲霉 *Aspergillus ochraceus*	肉桂、山苍子、丁香、百里香
黑曲霉 *Aspergillus niger*	肉桂、山苍子、丁香、百里香、甜薰衣草、阔叶迷迭香、小茴香、罗勒、牛至、佛手
炭黑曲霉 *Aspergillus carbonarius*	丁香、香茅
链格孢霉 *Alternaria alternata*	肉桂、丁香、八角、百里香、孜然、花椒、芥子
扩展青霉 *Penicillium expansum*	孜然、花椒、芥子
指状青霉 *Penicillium digitatum*	肉桂、丁香、八角、百里香
橘青霉 *Penicillium citrinum*	丁香、佛手
禾谷镰刀菌 *Fusarium graminearum*	肉桂、山苍子、丁香、百里香
硫色镰刀菌 *Fusarium sulphureum*	孜然、花椒、芥子
串珠镰刀菌 *Fusarium verticillioides*	香茅、广藿香、大叶桉、蛇床、迷迭香、姜黄
玉米弯孢霉 *Curvularia lunata*	香茅、广藿香、大叶桉、蛇床
尖孢炭疽菌 *Colletorichum acutatum*	肉桂、八角茴香、百里香、丁香、山苍子

2.2 植物精油的抑制真菌机制

精油种类繁多,不同品种的精油成分亦不相同,其主要成分包括醇、醛、酮和酚类化合物,如柠檬醛、肉桂醛、丁香酚、香芹酚、芳樟醇等。与细菌相比,真菌有较厚的细胞壁,植物精油对真菌的抑菌机理往往是多点协同作用[13],一是改变微生物形态结构,如降解细胞壁、改变细胞膜透性、破坏磷脂双分子层等;二是破坏微生物胞内酶系统;三是阻碍遗传物质的复制和微生物繁殖,最终造成微生物死亡或抑制微生物的繁殖。

2.2.1 *改变微生物形态结构* 已有大量研究报道了植物精油对真菌细胞壁和细胞膜的损害作用。植物精油具有脂溶性,可以扰乱细胞质膜的磷脂双分子层结构,破坏细胞壁的完整性,导致细胞内容物流出、菌丝断裂、细胞收缩。植物精油的多种活性成分是天然酚类物质,酚类物质可以作用于细胞壁和细胞膜,增加细胞膜的渗透性,使得胞内物质渗出,同时干扰膜的电子转移、阻碍主动运输[28-29]。酚类物质也会使细胞内容物凝固,破坏线粒体、细胞核等细胞器,最终导致细胞死亡[28-29]。丁香酚(4-烯丙基-2-甲氧基苯酚),其天然提取物主要来源于桃金娘科植物丁香,为有机酚类,300 μL·L^{-1}丁香酚对赭曲霉的生长有显著的抑制作用[14],0.3 μL·cm^{-3}丁香酚在 5 d 试验期间内可完全抑制黑曲霉的生长[15],这是由于丁香酚可引起细胞内胞浆聚集、内部规则排列的脊状突起消失,细胞核、线粒体等变形甚至溶解[14,16]。柠檬醛是柠檬草挥发油和山苍子挥发油的主要成分,在柠檬醛作用下,黑曲霉菌丝体形态严重扭曲,呈细铁丝网状,孢子囊出现不同程度的变小甚至脱落。柠檬醛、肉桂醛等醛类物质含有的亲水醛基,容易通过真菌表面的亲水基吸附穿透细胞壁,进而破坏细胞壁多糖结构。此外,醛基还可与菌体蛋白质功能基团,如-SH、-CH、-NH_2及-COOH 等作用,破坏真菌的质膜[17-18]。莳萝精油处理会损坏黄曲霉质膜,提高线粒体膜电位[19]。

2.2.2 *破坏微生物胞内酶系统* 植物精油可以破化微生物胞内酶系统,相关酶活性增强或失活,使细胞体新陈代谢系统紊乱,干扰微生物生长代谢,限制微生物生长发育。多种植物精油的有效成分含有醛基,可以与菌体蛋白质功能基团作用,从而使结合于胞膜上的蛋白酶失活[18]。香叶醇则分别通过诱导黄曲霉胞内活性氧的产生和改变赭曲霉的膜通透性来发挥抗菌防霉特性[20]。莳萝精油处理同样会导致黄曲霉活性氧的产生,以及三磷酸腺苷酶(adenosine triphosphatase, ATPase)和脱氢酶活性的下降[19]。

2.2.3　阻碍遗传物质的复制和微生物繁殖　植物精油可以灭活遗传物质,造成 DNA 损伤或遗传密码子改变。研究报道多酚物质对质粒 DNA 有降解作用[21],萜烯和酚类化合物能够抑制 DNA 的修复,α-松油醇可抑制 DNA 的合成[22]。植物精油能够通过上调或下调新陈代谢相关基因的表达,间接抑制菌体的生长。柠檬醛主要是通过下调病原菌有关的产孢基因和生长基因来发挥抑菌作用[20]。

3　植物精油抑制产毒真菌毒素的积累

营养物质丰富的食品、粮油、蔬菜、水果等在温暖潮湿的环境中极易受到丝状真菌污染从而引起食物腐败变质,此外,霉菌通过次生代谢产生的黄曲霉毒素、赭曲霉毒素、单端孢霉烯族化合物等,危害人类健康。植物精油除了具有广谱的抑菌效果之外,在抑制真菌毒素合成积累方面亦有显著效果。

3.1　植物精油抑制黄曲霉毒素的合成

邱实等[9]采用滤纸片法研究发现肉桂精油浓度为 2 μL·mL^{-1}时抑制黄曲霉生长,熏蒸方法下肉桂精油浓度为 1.5 μL·mL^{-1}时黄曲霉毒素被抑制。肉桂精油蒸气对黄曲霉菌丝体和孢子的抑制效果与蒸气浓度成正相关,肉桂精油蒸气熏蒸会使黄曲霉的菌丝体变得瘦小,孢子数量减少;当水分活度低于 0.96 时,精油蒸气可完全抑制黄曲霉菌丝体和孢子的生长;131.74 μL·L^{-1}的熏蒸浓度可以完全抑制黄曲霉的生长和黄曲霉毒素 B_1 的合成[23]。梁丹丹等[24]研究发现,肉桂醛、柠檬醛和丁香酚均能显著抑制黄曲霉生长,其中肉桂醛抑制效果最好,MIC 为 100 μg·mL^{-1},可完全抑制黄曲霉的生长及产毒。这是由于肉桂醛能够有效下调黄曲霉中黄曲霉毒素形成关键基因(*ver*-1)的表达,丁香酚能够有效下调另一个关键基因(*omtA*)的表达。

在玉米水分为 14%~40%时,肉桂醛对玉米黄曲霉污染的抑制率随水分含量的升高而显著下降,水分为 14%时抑制率最高,为 88.2%;对黄曲霉毒素 B_1 始终保持较强的抑制作用,水分为 14%时产毒抑制率最高,为 97.5%。贮藏温度为 20~37℃时,肉桂醛对黄曲霉污染的抑制率随温度的升高呈先升高后降低的趋势,贮藏温度为 28℃时黄曲霉污染抑制率最高,为 85.7%;随着贮藏温度的升高,肉桂醛对黄曲霉毒素 B_1 的抑制率呈先降低后升高又降低的趋势,20℃时抑制率最高,达到 91.0%[25]。藿香蓟精油能有效抑制寄生曲霉生长和黄曲霉毒素的合成[26]。孜然精油使黄曲霉生长和黄曲霉毒素 B_1 合成量分别下降 81.90%和 83.01%[27]。

3.2　植物精油抑制赭曲霉毒素的合成

100 mg·kg^{-1}肉桂醛可以完全抑制花生、玉米中赭曲霉的生长以及赭曲霉毒素的产生[28]。采用熏蒸法,肉桂醛浓度在 0.4~1.6 mmol·L^{-1}时抑制赭曲霉的生长,显著下调赭曲霉合成关键基因(*Aopks*,*Aonrps*)的表达[29]。Lappa 等[30]研究发现,丁香精油和香茅精油能够有效下调炭黑曲霉中赭曲霉毒素合成的关键基因(*AcOTAnrps*)的表达。然而,植物精油下调真菌毒素形成基因表达方面的研究还有待完善。

3.3　植物精油抑制镰刀菌属毒素的合成

柠檬醛能完全抑制禾谷镰刀菌的生长,丁香酚能显著抑制禾谷镰刀菌的生长,同时肉桂、丁香、玫瑰草和香茅精油可显著抑制脱氧雪腐镰刀菌烯醇的积累,当玉米水分含量为 21%时,丁香酚对脱氧雪腐镰刀菌毒素的抑制率达 98.33%[31-32]。da Silva Bomfim 等[33]研究发现迷迭香精油浓度为 600 μg·mL^{-1}时对镰刀菌的生长有抑制作用,抑制率达 67%,迷迭香精油浓度为 300 μg·mL^{-1} 能显著抑制伏马毒素(Fumonisin FB_1 和 FB_2)的合成,抑制率大于 97%。迷迭香精油抑制伏马毒素合成的效果明显优于抑制镰刀菌生长的效果。姜黄精油[34]也有类似的结果,精油处理浓度为 73.7 μg·mL^{-1} 就能显著抑制伏马毒素(FB_1 和 FB_2)的合成,而在精油处理浓度为 294.9 μg·mL^{-1}时才能有效抑制镰刀菌的生长。这可能与精油能够有效抑制真菌毒素的合成或者降解真菌毒素有关,也可能与精油能够有效下调真菌毒素合成基因的表达有关,同时,这可能为将精油与其他抑菌物质联用提供了一种思路。

3.4　植物精油对真菌毒素的降解作用

真菌毒素除具有抑制真菌毒素合成基因表达和真菌毒素积累的作用外,某些植物精油中的有效成分对真菌毒素还具有降解作用。研究发现将山苍子油有效成分柠檬醛直接加入黄曲霉毒素标准品中,能迅速破坏黄曲霉毒素 B_1[35]。研究发现将竹芋精油与含赭曲霉毒素的可可粉混匀后孵育 5 h,精油浓度为 500 mg·kg^{-1} 时,赭曲霉毒素降解率在 70%左右,精油浓度为 1 000 mg·kg^{-1}时,降解率高达 90%[36]。植物精油在粮仓中熏蒸可降解真菌毒素,季茂聘[37]利用中草药对黄曲霉毒素 B_1 含量为 50 μg·kg^{-1}的大米进行熏蒸,可使黄曲霉毒素的荧光完全消失,表明中草药中的挥发性物质对黄曲霉毒素有降解作用,但并未对残留毒素进行定量检测。肉桂精油熏蒸含有黄曲霉毒素的样品,能够使超标样品黄曲霉毒素的含量降到国家限量标准以下[32]。但是,目前对于植物精油降解真菌毒素作用机理的研究不深入,其作用机制仍需进一步研究。

4 精油在食品防霉保质中的应用

植物精油的抑菌作用受食品成分的影响,如脂肪、淀粉、蛋白质等,导致其抑菌效果往往不如在培养基中对真菌的抑制效果。Guerra 等[38]研究发现,薄荷精油与壳聚糖联用处理 7 d,在沙鲍弱氏琼脂培养基上霉菌生长抑制率超过 90%;而相同浓度精油与壳聚糖联用处理圣女果,在室温下与对照组相比霉菌感染率降低不到 40%,但仍有 30%的圣女果发霉。在食品中常用的精油处理方法有喷涂法、浸渍法、气态熏蒸法、涂膜保鲜法等。喷涂法是将精油直接喷涂在食品表面,操作简便。浸渍法常用于蔬菜叶保鲜,如生菜和卷心莴苣。精油熏蒸处理是使用较为普遍的方法,已经在冬枣[4]、油桃[39]、甜樱桃[40]、面包[5]、玉米[25,41]的贮藏中取得了较好的保鲜效果。多数精油熏蒸处理的抑菌效果好于直接接触处理[42]。近年来,为保证食品的营养价值和感官品质,在精油熏蒸处理的基础上,越来越多的研究集中于精油的封装缓释、精油与其他方法联用等保鲜方面。

4.1 精油的复配及协同增效作用

肉桂精油(肉桂醛)可作为食品香精或防腐剂用于食品加工,其对霉菌有强烈的抑制效果,对霉菌的抑制效果要好于丁香、百里香、迷迭香、牛至、山苍子精油[42-43]。然而,肉桂精油具有明显而强烈的香气,使其在食品加工中的应用受到了限制。在肉桂醛中添加芳樟醇得到复配精油,其抑菌活性高于原精油[44],且由于肉桂醛的使用量变少,将复配精油用于食品加工,其对食品本身的风味影响更小。精油或者其活性成分之间复合,形成复配精油,可以起到协同增效作用[45],肉桂醛与柠檬醛复合形成的复配精油,协同抗菌作用明显[46]。Ji 等[47]研究了 97 种植物精油的协同抑菌效果,发现肉桂与香茅的精油蒸汽对牛肉干培养基中的顶青霉(*Penicillium corylophilum*)有良好的抑菌效果。有研究将复配精油抑制霉菌生长的效果与防霉剂丙酸进行比较,如白懋嘉等[48]将桉叶素和松油醇进行复配得到复合精油,发现其对黄曲霉和桔青霉的抑制效果明显优于丙酸;王利敏等[49]将肉桂醛、柠檬醛、丁香酚、薄荷醇进行复配得到复合精油,在使用量仅为丙酸 1/10 的情况下,对玉米中霉菌生长的抑制效果优于丙酸。由于精油的协同增效作用,复配精油在食品加工中的应用具有更大的潜力,可以降低精油的使用量,减少精油气味对食品感官品质带来的负面影响,因此,复配精油的协同增效作用机制和合适的精油配方也有待研究与完善。

4.2 精油的封装和缓释

精油的易挥发性限制了其在食品防霉保质方面的应用。结合静电纺丝、微(纳米)胶囊、纳米乳液、Pickering 乳液等技术让植物精油在封装的环境中缓释,能够延长精油的处理时间、减少精油的使用量、减轻精油带来的刺激性气味。将植物精油封装在食品的涂膜层中,相当于在食品表面形成了精油蒸汽,可以起到缓释效果,并降低精油本身风味对食品感官品质带来的影响[2]。目前这种精油涂膜保鲜技术在鲜肉、海鱼等[2,50-51]水产品中也有研究报道。

赵瑞鹏[52]以壳聚糖为壁材,制备了肉桂精油微胶囊,其包埋率最高达 70.9%,微胶囊包裹后对黑曲霉和青霉均有抑制效果,且抑菌效果受时间的影响较小,具有缓释效果。Jiang 等[53]制备了由玉米蛋白、果胶复合纳米颗粒稳定的肉桂精油 Pickering 乳液,并将其用于鲜切苹果的熏蒸保鲜,发现肉桂精油 Pickering 乳液在保藏时间超过 6 d 后其保鲜效果明显优于原肉桂精油,具有明显的缓释效果。Zhang 等[54]用壳聚糖、海藻酸盐作为生物聚合物与肉桂精油结合制备了多层膜体系,改善了肉桂挥发油的缓释性能,并在苹果保鲜中应用,有效地抑制了扩展青霉(*Penicillium expansion*)的生长。Monserrat 等[55]制备了基于壳聚糖、玉米蛋白的八角精油可食用膜,在 5.6 $\mu g \cdot mL^{-1}$ 的低浓度下能有效抑制青霉菌和根霉菌的生长。Akshay 等[56]制备了以百里香酚、肉桂酸甲酯和芳樟醇为原料的纳米胶囊,并将其用于谷物的保藏,6 个月后,浓度为 0.3 $\mu L \cdot mL^{-1}$ 纳米胶囊处理的谷物酶变率低于 25%。Wan 等[57]制备了 5 种精油的纳米乳液,研究了精油成分与加工工艺对其抗真菌及毒素抑制效果的影响,以禾谷镰刀菌为例,精油的主要化学成分对其纳米乳的长期稳定性、抗真菌活性和抑制真菌毒素的产生有显著影响,由于具有更大的溶解度,精油在纳米乳形态下的真菌毒素抑制活性显著增强。Li 等[58]制备了佛手精油的纳米乳液,体系稳定,但抗真菌(*A. niger* 和 *P. citrinum*)活性低于预期。

将精油包封缓释可能会在短期内降低精油的抑菌效果,但在较长期的食品防霉保质中优势明显。由于精油包封缓释处理精油使用量低于直接使用原精油处理,其对食品感官品质带来的不良影响也相对较小。因此,寻找有效、稳定、经济的精油封装体系,已然成为新的研究热点。

4.3 精油与其他保鲜技术联用

精油与其他防腐技术联合使用,可以起到协同增

效作用[59],从而降低精油的使用量,减少对食品风味的影响,更有利于精油在食品工业上的应用。目前报道较多的有精油与壳聚糖联用。Hajer 等[60]将佛手柑精油与槐豆胶和壳聚糖复配,得到的复合物精油能够显著抑制黄曲霉的生长,且效果要优于单独使用佛手柑精油。杨红[4]研究了丁香精油与壳聚糖复合物对灰霉菌、青霉菌、链格孢菌、浆胞病菌的抑制作用,发现复合物能够显著抑制 4 种真菌的孢子萌发和菌丝生长,且效果优于同浓度的丁香精油。Naveen 等[61]将依兰花精油与辐照技术联用,可以抑制禾谷镰孢菌的生长及其毒素[(deoxynivalenol) DON 和(zearalenone) ZEN)]的产生,用线性回归方法验证了精油、辐照联合抑菌作用的有效性,并通过与单独使用辐照或精油处理的效果比较,发现联用处理抑菌效果明显优于单独处理。将植物精油蒸汽与空气负离子结合技术,可以增强精油的抑菌作用,并降低精油对食品感官品质产生的影响[62]。

5　展望

近年来,对植物精油的资源开发,提取工艺,以及精油抑制真菌生长和产毒机理的研究日益深入,开发新型绿色防霉抑菌剂已成为当今研究的热点。综上所述,植物精油具有易挥发、低残留的特点,能显著抑制真菌生长及真菌毒素合成,而且对环境友好,不危害人体健康,可以作为天然抑菌剂用于食品的防霉保质。植物精油在蔬果保鲜、粮食谷物贮藏,防止霉变变质及控制真菌毒素污染方面将具有广阔的应用前景。由于精油自身的芳香气味和高挥发性,将其用于食品保鲜可改变食品的感官品质,但如何减少精油的用量、延长精油的有效处理时间成为目前急需解决的科学问题。结合静电纺丝、微(纳米)胶囊、纳米乳液、Pickering、成膜等技术将植物精油封装缓慢释放到环境中,或者通过精油复配,精油与其他抑菌物质复配(如壳聚糖,乳酸菌肽,溶菌酶等),或与其他防腐保鲜技术(如气调包装,辐照处理等)联合使用,可能会成为新的研究热点。

参考文献:

[1] 李燕君, 孔维军, 李梦华, 杨世海, 杨美华. 植物精油抑制真菌及真菌毒素的研究进展[J]. 中草药, 2016, 47(11): 2011-2018

[2] Dinesh J, Cheorun J. Essential oils as potential antimicrobial agents in meat and meat products: A review [J]. Trends in Food Science and Technology, 2013, 34(2): 96-108

[3] Bhanu P, Akash K, Prashant K, Dubey N. Plant essential oils as food preservatives to control moulds, mycotoxin contamination and oxidative deterioration of agri-food commodities - potentials and challenges [J]. Food Control, 2015, 47: 381-391

[4] 杨红. 丁香精油对冬枣防病保鲜效应与机理研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006

[5] 邓业成, 宁蕾. 4 种植物精油的抑菌活性及应用[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2012, 30(3): 288-294

[6] 孙伟, 王淳凯, 蔡云升, 瞿伟菁, 徐志敏. 16 种芳香植物精油抗氧化活性的比较研究[J]. 食品科技, 2004, 11(11): 55-57

[7] 中华人民共和国国家医疗保障局. GB 2760-2014 食品安全国家标准食品添加剂使用标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014

[8] 袁萍, 王国亮, 龚复俊, 王爱芬, 王孔星. 3 种植物精油对霉菌的抑制作用[J]. 武汉植物学研究, 2001, 19(6): 521-523

[9] 邱实, 赵雪, 麻馨月. 肉桂精油对黄曲霉毒素抑制作用的研究[J]. 黑龙江科学, 2018, 9(18): 24-25

[10] 莫小路, 王玉生, 曾庆钱, 汪小根, 严振. 几种药用植物精油的抗真菌活性研究[J]. 天然产物研究与开发, 2005(6): 696-699

[11] 李凤清. 植物精油的抑菌评价及其应用[D]. 南京: 南京师范大学, 2014

[12] 马萱, 田慧芳. 4 种芳香植物精油对黑曲霉菌抑菌作用研究[J]. 北京农学院学报, 2015, 30(1): 15-18

[13] 陈建烟, 李永裕, 吴少华. 植物精油生物活性作用机理研究进展[J]. 天然产物研究与开发, 2012, 24(9): 1312-1318

[14] 滑慧娟. 挥发性植物精油抑制赭曲霉生长及产毒的研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2015

[15] 钟业俊, 徐欣源, 刘成梅, 孙健, 吴建永, 刘桃英. 茶树油、丁香酚和柠檬醛对荔枝黑曲霉的抑制作用[J]. 食品科学, 2012, 33(11): 21-24

[16] 吕世明, 陈杖榴, 陈建新, 邱电, 李春梅. 丁香酚体外抑菌作用研究[J]. 食品科学, 2008(9): 122-124

[17] 戴向荣, 蒋立科, 罗曼. 肉桂醛抑制黄曲霉机理初探[J]. 食品科学, 2008, 29(1): 36-40

[18] 张宽朝, 魏练平, 沈浩, 蒋立科. 肉桂醛、柠檬醛抑制黑曲霉生长的比较研究[J]. 中国微生态学杂志, 2011, 23(2): 141-143

[19] Tian J, Ban X Q, Zeng H, He J S, Chen Y X, Wang Y W. The mechanism of antifungal action of essential oil from Dill (*Anethum graveolens* L.) on *Aspergillus flavus* [J]. PLoS One, 2012, 7(1): e30147

[20] 汤曦, 邵烨林, 周文文. 精油成分香叶醇和柠檬醛对储粮霉菌的抑制及防控机制[C]//中国食品科学技术学会, 中国食品科学技术学会第十五届年会论文摘要集. 青岛: 中国食品科学技术学会, 2018: 439

[21] Katrina B, Kamal A, Danielle M. Unraveling a mechanism of honey antibacterial action: Polyphenol/H_2O_2-induced oxidative effect on bacterial cell growth and on DNA degradation [J]. Food Chemistry, 2012, 133(2): 329-336

[22] 杨莎, 陆大洪, 秦海. 精油抗菌机理研究进展[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(36): 27-28

[23] 王一非, 卞文怡, 刘竹臻, 何艳, 宋晓秋, 黄雨晴. 肉桂精油蒸气对黄曲霉生长及其毒素 B_1 合成的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(9): 119-123

[24] 梁丹丹, 邢福国, 王龑, 赵月菊, 刘阳. 植物提取物抑制玉米中黄曲霉生长及产毒研究[J]. 粮食与饲料工业, 2015, 12(8): 51-56

[25] 梁丹丹. 三种植物精油抑制玉米中黄曲霉生长及产毒研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015

[26] Rajaram P, Mansingraj S. Antia atoxigenic and an tioxidant activity of an essential oil from *Ageratum conyzoides* [J]. Journal of the Science of Food and Agricultrue, 2010, 90 (4): 608- 614

[27] 徐丹, 卫梦绮, 李亚俊, 薛海燕, 宋宏新. 孜然精油对产毒黄曲霉的抑制活性研究[J]. 天然产物研究与开发, 2018, 30(9): 129-135

[28] Hua H J, Xing F G, Selvaraj J, Wang Y, Zhao Y J, Zhou L, Liu X, Liu Y. Inhibitory effect of essential oils on *Aspergillus ochraceus* growth and Ochratoxin A production[J]. PLoS One, 2018, 9(9): e108285

[29] Wang L M, Jin J, Liu X, Wang Y, Liu Y, Zhao Y J, Xing F G. Effect of cinnamaldehyde on morphological alterations of *Aspergillus ochraceus* and expression of key genes involved in Ochratoxin A biosynthesis [J]. Toxins, 2018, 10(9): 340

[30] Lappa I K, Simini E, Nychas E G J, Panagou Z E. *In vitro* evaluation of essential oils against *Aspergillus carbonarius* isolates and their effects on Ochratoxin A related gene expression in synthetic grape medium [J]. Food Control, 2017, 73: 71-80

[31] Marín S, Andrea V, Antonio J R, Vicente S. Effect of essential oils on zearalenone and deoxynivalenol production by *Fusarium graminearum* in non-sterilized maize grain [J]. Food Microbiology, 2004, 21(3): 313-318

[32] 袁媛, 邢福国, 刘阳. 植物精油抑制真菌生长及毒素积累的研究[J]. 核农学报, 2013, 27(8): 1168-1172

[33] da Silva Bomfifim N, Nakassugi L P, Oliveira J F P, Kohiyama C Y, Mossini S A G, Grespan R, Nerilo S B, Mallmann C A, Filho B A A, Machinski Jr M. Antifungal activity and inhibition of fumonisin production by *Rosmarinus officinalis* L. essential oil in *Fusarium verticillioides* (Sacc.) Nirenberg [J]. Food Chemistry, 2015, 166: 330-336

[34] Geleys B A, Flavio D F, Natália da S B, Paula A de S R dos S, Rosane M P, Tatiane B, Carlos A M, Benício A de A F, Jane M G M, Miguel M Jr. *Curcuma longa* L. essential oil composition, antioxidant effect, and effect on *Fusarium verticillioides* and fumonisin production [J]. Food Control, 2017, 73: 806-813

[35] 黄福辉, 项发根, 周为民. 关于山苍子有效成分在储粮中的应用[J]. 粮食储藏, 1980(2): 19-22

[36] Aroyeun S, Adegoke G. Reduction of Ochratoxin A (OTA) in spiked cocoa powder and beverage using aqueous extracts and essential oils of *Aframomum danielli* [J]. African Journal of Biotechnology, 2007, 6(5): 612-616

[37] 季茂聘. 浅谈粮食中黄曲霉毒素 B_1 的去毒方法[J]. 粮油仓储科技通讯, 2005(2): 50

[38] Guerra I C D, de Oliveira P D L, de Souza Pontes A L, Lúcio A S S C, Tavares J F, Barbosa-Filho J M, Madruga M S, de Souza E L. Coatings comprising chitosan and *Mentha piperita* L. or *Mentha* × *villosa* Huds essential oils to prevent common postharvest mold infections and maintain the quality of cherry tomato fruit [J]. International Journal of Food Microbiology, 2015, 214: 168-178

[39] 王靖博, 张敏, 董睿, 吴华, 冯俊涛, 张兴. 3 种植物精油熏蒸处理对油桃保鲜效果的影响[J]. 核农学报, 2018, 32(5): 933-940

[40] 杜小琴. 植物精油对甜樱桃采后病原真菌的抑制作用及其贮藏效果研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2016

[41] 袁媛. 植物精油熏蒸控制玉米中真菌毒素的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013

[42] 贺红宇, 朱永清, 王自鹏, 刘培, 詹敏, 曾晓丹. 10 种植物精油对圣女果中三种致病菌抑制效果的研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(18): 153-157

[43] 林树花, 王伟, 张菊华, 阳秀莲. 10 种植物精油对蓝莓病原菌的体外抑菌活性初筛[J]. 湖南农业科学, 2018(2): 73-75

[44] 王进, 曹先爽, 宋丽, 丁兆青, 汤锋, 岳永德. 吹扫捕集-热脱附-气相色谱-质谱联用法分析不同产地香樟叶精油成分及抑菌活性比较[J]. 食品科学, 2017, 38(12): 131-136

[45] 柴向华, 董艳, 吴克刚, 崔绮嫦, 马海杰. 植物精油对食品中常见有害微生物的抑菌活性研究[J]. 现代食品科技, 2016, 32(8): 123-127

[46] 刘欢, 夏光辉, 温春野. 复配精油对采后葡萄灰霉菌抑制作用的研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(21): 115-118

[47] Ji H, Kim H, Beuchat L R, Ryu J. Synergistic antimicrobial activities of essential oil vapours against *Penicillium corylophilum* on a laboratory medium and beef jerky [J]. International Journal of Food Microbiology, 2019, 291: 104-110

[48] 白懋嘉, 刘布鸣, 柴玲, 马冠华, 窦彦霞. 桉叶素-松油醇型复合精油对 6 种霉菌的抑制作用研究[J]. 香料香精化妆品, 2017(5): 11-16

[49] 王利敏, 邢福国, 吕聪, 刘阳. 复合植物精油防霉剂对玉米霉菌及真菌毒素的控制效果[J]. 核农学报, 2018, 32(4): 732-739

[50] Lin L, Mao X, Sun Y, Rajivgandhi G, Cui H. Antibacterial properties of nanofibers containing chrysanthemum essential oil and their application as beef packaging [J]. International Journal of Food Microbiology, 2019, 292: 21-30

[51] Haute S V, Raes K, der Meeren P V, Sampers I. The effect of cinnamon, oregano and thyme essential oils in marinade on the microbial shelf life of fish and meat products [J]. Food Control, 2016, 68: 30-39

[52] 赵瑞鹏. 肉桂精油微胶囊的制备及其抑菌效果研究[D]. 上海: 上海应用技术学院, 2015

[53] Jiang Y, Wang D, Li F, Li D P, Huang Q R. Cinnamon essential oil Pickering emulsion stabilized by zein-pectin composite nanoparticles: Characterization, antimicrobial effect and advantages in storage application [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 148: 1280-1289

[54] Zhang W L, Shu C, Chen Q Y, Cao J K, Jiang W B. The multi-layer film system improved the release and retention properties of cinnamon essential oil and its application as coating in inhibition to *penicillium expansion* of apple fruit [J]. Food Chemistry, 2019, 299: 125109

[55] Monserrat E G, Georgina C D, Jorge C P, Angélica M M, Di P P,

Blanca G A, Aldo A R, Carlos R G. Physical, structural, barrier, and antifungal characterization of chitosan-zein edible films with added essential oils [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2017, 18(11): 2370

[56] Akshay K, Anupam K, Prem Pratap S, Bhanu P. Nanoencapsulated plant-based bioactive formulation against food-borne molds and aflatoxin B_1 contamination: Preparation, characterization and stability evaluation in the food system [J]. Food Chemistry, 2019, 287: 139-150

[57] Wan J, Zhong S B, Schwarz P, Chen B C, Rao J J. Physical properties, antifungal and mycotoxin inhibitory activities of five essential oil nanoemulsions: Impact of oil compositions and processing parameters [J]. Food Chemistry, 2019, 291: 199-206

[58] Li Z H, Cai M, Liu Y S, Sun P L. Development of finger citron (*Citrus medica* L. var. *sarcodactylis*) essential oil loaded nanoemulsion and its antimicrobial activity [J]. Food Control, 2018, 94: 317-323

[59] Nguefack J, Tamgue O, Lekagne J, Dakole C, Leth V, Vismer H, Amvam H, Nkengfack A. Synergistic action between fractions of essential oils from *Cymbopogon citratus*, *Ocimum gratissimum* and *Thymus vulgaris* against *Penicillium expansum* [J]. Food Control, 2012, 23(2): 377-383

[60] Hajer A, Khaoula K, Fabio L, Agata M, Giuseppe M, Moktar H, Cristina R. Efficacy of the combined application of chitosan and Locust bean gum with different citrus essential oils to control postharvest spoilage caused by *Aspergillus flavus* in dates [J]. International Journal of Food Microbiology, 2014, 170: 21-28

[61] Naveen K, Venkataramana M, Jalarama R, Chandranayaka S. Discrete and combined effects of Ylang-Ylang (*Cananga odorata*) essential oil and gamma irradiation on growth and mycotoxins production by *Fusarium graminearum* in maize [J]. Food Control, 2018, 94: 276-283

[62] 杨乔木, 谢春, 闫博文, 陈硕, 王一非. 植物精油蒸气与空气负离子在食品保藏中的应用研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(3): 147-152

Advance in Anti-Fungus Application of Plant Essential Oil in Food Preservation

WANG Yan[1] LIN Wei[1] YU Genrong[2] SUN Peilong[1,*]

([1]*College of Food Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang* 310014;
[2]*Hangzhou Meiyuan Food Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang* 311106)

Abstract: In the process of food storage and transportation, it is easily to be polluted by fungi and cause spoilage. As a natural fungistat, plant essential oil is volatile, biodegradable, low residue, low toxicity, and environmentally friendly, which has become a hot spot in the research and development of food industry. This paper reviews the sources and active ingredients of plant essential oils, the inhibitory effect on fungal growth and mycotoxin synthesis, and their applications in food preservation, which would provide reference for further development and utilization of plant essential oil as natural antifungal agents and food preservatives.

Keywords: essential oil, antifungal, fungi, mycotoxins, food preservation