

姜冬梅, 王刘庆, 姜楠, 等. 植物精油及其纳米制剂防控农产品中真菌毒素的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(19): 449-459. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022050271

JIANG Dongmei, WANG Liuqing, JIANG Nan, et al. Review on the Prevention and Control of Mycotoxins in Agricultural Products Using Essential Oils and Their Nanoformulations[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(19): 449-459. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022050271

· 专题综述 ·

植物精油及其纳米制剂防控农产品中真菌毒素的研究进展

姜冬梅, 王刘庆, 姜楠, 翟文磊, 王蒙*

(北京市农林科学院质量标准与检测技术研究所, 农业农村部农产品质量安全风险评估实验室(北京), 北京 100097)

摘要: 真菌毒素是真菌生长过程中产生的有毒代谢产物, 是危害农产品质量安全的重要因子。植物精油是真菌生长和真菌毒素累积的天然抑制剂, 但易挥发、稳定性和水溶性差等弊端限制了其应用, 近年来植物精油纳米制剂的开发和利用可解决植物精油上述弊端, 提升其生物利用度。本文总结了植物精油可通过抑制真菌毒素产生和降解真菌毒素的方式降低农产品中真菌毒素的污染水平, 探讨了植物精油抑制真菌生长产毒的机制, 综述了植物精油及其纳米制剂防控农产品中真菌毒素污染的研究现状, 并对存在问题进行了讨论, 以期为进一步开发和利用植物精油防控真菌毒素提供有益参考。

关键词: 植物精油, 纳米制剂, 真菌, 真菌毒素, 农产品

中图分类号: R155.5

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)19-0449-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022050271



本文网刊:

Review on the Prevention and Control of Mycotoxins in Agricultural Products Using Essential Oils and Their Nanoformulations

JIANG Dongmei, WANG Liuqing, JIANG Nan, ZHAI Wenlei, WANG Meng*

(Risk Assessment Laboratory for Agro-products (Beijing), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Quality Standard and Testing Technology, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract: Mycotoxins are toxic metabolites produced by fungi during their growth and they are important detrimental factors endangering the quality and safety of agricultural products. Essential oils are natural inhibitors of fungal growth and accumulation of mycotoxins, but characteristics of strong volatility, poor stability and low water solubility limit their applications. In recent years, the development and utilization of nanoformulations can solve the above drawbacks of essential oils, and improve their bioavailability. This paper summarizes that essential oil can reduce the contamination level of mycotoxins in agricultural products by inhibiting the production of mycotoxins and degrading mycotoxins, overviews the inhibitory mechanism of essential oil against the growth of fungi and production of mycotoxins, reviews the research status of the prevention and control of mycotoxins in agricultural products using essential oils and their nanoformulations, and discusses the existing problems, in order to provide useful references for the further development and utilization of essential oils for the prevention and control of mycotoxins.

Key words: essential oil; nanoformulation; fungi; mycotoxin; agricultural products

真菌毒素是指曲霉属(*Aspergillus* spp.)、青霉属 (*Penicillium* spp.)、镰刀菌属(*Fusarium* spp.)和交链

收稿日期: 2022-05-23

基金项目: 北京市自然科学基金项目(6222012);北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJ CX20230217);北京市农林科学院质量标准与检测技术研究所储备性研究课题(ZBCX202203)。

作者简介: 姜冬梅(1984-),女,博士,副研究员,研究方向:农产品质量与安全,E-mail: jiangdm@iqstt.cn。

*通信作者: 王蒙(1980-),女,博士,研究员,研究方向:农产品质量与安全,E-mail: wangm@iqstt.cn。

孢菌属(*Alternaria* spp.)等属的产毒真菌产生的小分子次级代谢产物,主要包括黄曲霉毒素(aflatoxins, AFs)、赭曲霉毒素(ochratoxins)、展青霉素(patulin, PAT)、脱氧雪腐镰刀菌烯醇(deoxynivalenol, DON)等单端孢霉烯族毒素、玉米赤霉烯酮(zearalenone, ZEN)、伏马菌素(fumonisin)及交链孢酚(alternariol, AOH)等交链孢毒素^[1]。农产品在生产、加工、贮藏、运输及销售过程中极易受到真菌及真菌毒素的污染。据联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)统计,全世界每年约有25%的农产品因真菌及真菌毒素污染,造成巨大的经济损失^[2],而且真菌毒素有致畸、致癌和致突变等有害作用,严重威胁人类的身体健康和生命安全^[1]。目前,真菌毒素的防控问题是一个世界性难题,由于化学合成农药存在毒性残留及二次污染等问题,开发新型绿色的真菌及真菌毒素抑制剂已成为国内外食品行业学者关注的研究热点之一。

植物精油(essential oil, EO)及其活性成分具有抑菌活性强、抑菌谱广、生物降解性良好、无毒或低毒、对环境友好等优点,可作为真菌生长和真菌毒素累积的天然绿色抑制剂,应用于食品的防霉保鲜^[3],但易挥发、稳定性和水溶性普遍较差、分散性不均匀、储运不方便且部分精油具有刺激性气味从而影响食品的感官特性等弊端限制了植物精油及其活性

成分的大规模应用和发展,因此,寻找一种安全高效的利用方法对植物精油及其活性成分的大规模应用具有重要意义。纳米技术的发展为解决这一问题提供了新的途径和方法,研究表明,将植物精油及其活性成分制备成纳米制剂,能够提高其稳定性、水溶性和生物利用度,是利用植物精油及其活性成分防控农产品及其制品中真菌毒素污染的有效策略^[4]。

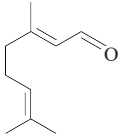
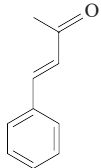
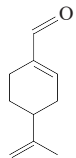
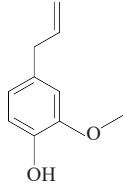
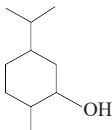
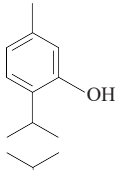
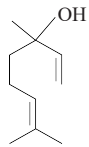
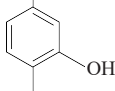
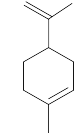
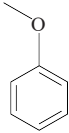
本文首先介绍了植物精油及其活性成分的种类,其次概述了植物精油及其活性成分抑制农产品中真菌毒素累积的途径和效果,然后对不同纳米制剂在防控真菌毒素污染方面的应用效果进行了总结,最后对植物精油及其活性成分应用于农产品中真菌毒素防控存在的问题和应用前景进行了讨论和展望,以期为进一步利用植物精油及其活性成分研发天然、绿色的真菌毒素抑制剂提供科学参考。

1 植物精油及其活性成分

植物精油又称挥发油、香精油,是广泛存在于天然植物中的一类化学成分复杂的小分子次生代谢产物,一种精油通常含有几十甚至上百种化学成分,主要包括萜类化合物、芳香族化合物、脂肪族化合物和氮硫化合物^[5],目前已报道的具有抗真菌及抗真菌毒素活性的植物精油活性成分主要为柠檬醛、紫苏醛、薄荷醇、芳樟醇、柠檬烯等萜类化合物,以及肉桂醛、丁香酚、百里香酚、香芹酚、茴香醚等芳香族化

表1 常见抑菌植物精油及其主要活性成分

Table 1 Common antifungal essential oils and their main active components

植物精油	主要活性成分		植物精油	主要活性成分	
	名称	结构式		名称	结构式
山苍子精油	柠檬醛(C ₁₀ H ₁₆ O)		肉桂精油	肉桂醛(C ₉ H ₈ O)	
紫苏精油	紫苏醛(C ₁₀ H ₁₄ O)		丁香精油	丁香酚(C ₁₀ H ₁₂ O ₂)	
薄荷精油	薄荷醇(C ₁₀ H ₂₀ O)		百里香精油	百里香酚(C ₁₀ H ₁₄ O)	
芳樟精油	芳樟醇(C ₁₀ H ₁₈ O)		牛至精油	香芹酚(C ₁₀ H ₁₄ O)	
柠檬精油	柠檬烯(C ₁₀ H ₁₆)		茴香精油	茴香醚(C ₇ H ₈ O)	

合物(表 1)。研究表明,植物精油的主要成分决定其生物活性,次要成分可能起协同增效的作用,不同精油之间也可能具有协同增效的作用,具有协同增效功能的精油或活性成分制成复配精油后能够提高其生物活性和利用率,进而提升其在食品工业中的应用潜力^[6-7]。目前,已有约 300 种精油表现出重要的商业价值^[8],其中山苍子油、丁香叶油、八角茴香油、肉豆蔻油、百里香油等多种植物精油以及肉桂醛、柠檬醛、丁香酚、百里香酚等多种精油活性成分已被列入我国允许使用的食品天然香料名单^[9]。

2 植物精油及其活性成分抑制真菌毒素累积

农产品营养物质丰富,在潮湿环境中极易受到产毒真菌的侵染而腐败变质,进而被真菌毒素污染,危害人类健康。植物精油及其某些活性成分能够通过抑制真菌毒素的产生及降解真菌毒素等方式抑制农产品中真菌毒素的累积,从而降低农产品中真菌毒素污染的风险,提高农产品的质量水平^[10-11]。

2.1 抑制真菌毒素的产生

真菌毒素的产生与真菌的生长及产毒相关基因的表达调控密不可分,因此植物精油及其活性成分抑制真菌毒素产生的途径主要有两种:一是通过抑制真菌生长而间接抑制真菌毒素的产生,二是通过下调真菌毒素生物合成调控相关基因的表达而直接抑制真菌毒素的产生。

近年来,国内外学者对植物精油及其活性成分抑制真菌生长及真菌毒素产生的作用及机制进行了大量的研究,发现包括丁香精油、肉桂精油、丁香酚、肉桂醛等在内的多种植物精油及其活性成分能够抑制黄曲霉毒素、赭曲霉毒素、镰刀菌毒素及交链孢毒素等农产品中常见真菌毒素的产生及相关真菌的生长(表 2),且抑制效果与精油浓度密切相关,呈剂量效应,如 Juglal 等^[12]研究了丁香精油(*Syzygium aromaticum* L.)对寄生曲霉(*Aspergillus parasiticus*)和串珠镰刀菌(*Fusarium moniliforme*)生长及产毒的影响,结果表明,丁香精油可显著抑制寄生曲霉和串珠镰刀菌的生长,也可显著抑制黄曲霉毒素及伏马菌素 B₁(fumonisin B₁, FB₁)的产生,且抑制率与精油呈剂量效应;在抑制黄曲霉毒素产生方面,0.05 μL/mL 丁香精油可使黄曲霉毒素 B₁(aflatoxin B₁, AFB₁)和黄曲霉毒素 B₂(aflatoxin B₂, AFB₂)的产量分别下降 62.8% 和 76.5%,0.1 μL/mL 丁香精油,可完全抑制寄生曲霉产生 AFB₁ 和 AFB₂;在抑制伏马菌素产生方面,1 μL/mL 丁香精油可使 FB₁ 产量降低 69%,2 μL/mL 丁香精油可使串珠镰刀菌中 FB₁ 产量进一步降低至 0.6 μg/mL,下降率达 78%;因此,丁香精油可用于谷物中产毒真菌及真菌毒素的防控。肉桂醛是目前研究较多的精油活性成分之一,Hua 等^[13]研究了肉桂醛对赭曲霉(*Aspergillus ochraceus*)生长产毒的影响,发现熏蒸和接触条件下,肉桂醛均可显著抑制赭曲霉的生长及赭曲霉毒素 A(ochratoxin A,

OTA)的产生,且抑制率均随肉桂醛剂量的增加而升高,熏蒸条件下 150 μL/L 的天然肉桂醛即可完全抑制赭曲霉的生长;接触条件下天然肉桂醛在较低浓度(50~75 μg/mL)时即可显著抑制 OTA 的产生,在较高浓度(100~200 μg/mL)时几乎完全抑制 OTA 的产生。

植物精油及其活性成分对真菌生长产毒的抑制效果受到多种因素的影响,除其自身的抑菌特性之外,水分活度(water activity, a_w)、温度及 pH 等外界环境因素也会影响植物精油及其活性成分对真菌毒素累积的抑制作用,如 Passone 等^[14]发现剂量为 1500 μL/L 的丁香精油、波尔多精油(*Pëumus boldus* Mol.)和 *poleo* 精油(*Lippia turbinata* var. *Integrifolia* (Griseb.)) 均可有效抑制黑曲霉(*Aspergillus niger*)和炭黑曲霉(*Aspergillus carbonarius*)的生长及 OTA 的累积,且抑制作用与水分活度相关,波尔多精油剂量为 2000~3000 μL/L 时可完全抑制黑曲霉生长和 OTA 产生,*poleo* 精油和丁香精油效果次之,以上 3 种精油均可用于花生储存过程中防控 OTA 的污染。

目前对于植物精油及其活性成分抑制真菌生长产毒的机制研究主要集中在破坏细胞壁和细胞膜的结构和功能、降低孢子萌发、破坏氧化还原系统、紊乱能量代谢、干扰真菌生长产毒相关基因的表达及蛋白质合成等方面^[15]。

整体而言,植物精油及其活性成分对真菌生长及真菌毒素产生的抑制机制通常是多点协同作用(图 1),如肉桂醛可通过特异性地阻止细胞壁中葡聚糖和几丁质的合成导致细胞壁受损,通过破坏细胞膜的结构而影响细胞膜通透性,导致细胞内容物及重要离子泄漏,还可通过损伤线粒体影响菌体的氧化应激反应和能量代谢从而抑制黄曲霉的生长,减少黄曲霉的生物量进而抑制黄曲霉毒素的累积^[16];在直接抑制真菌毒素生物合成方面,肉桂醛可抑制黄曲霉毒素合成关键基因(*aflR*、*nor-1*、*ver-1*、*omtA* 和 *aflT*)的表达,阻断黄曲霉毒素合成途径,直接抑制黄曲霉毒素的产生^[17]。值得一提的是,近年来,交链孢毒素越来越受到关注,植物精油及其活性成分抑制交链孢毒素产生的相关研究报道越来越多,如 Xu 等^[18]研究发现,肉桂醛浓度为 200 μL/L 时可有效抑制互隔交链孢菌的生长及 AOH 和交链孢酚单甲醚(alternariol monomethyl ether, AME)这两种交链孢毒素的产生,由于互隔交链孢菌和 AOH 等交链孢毒素是果蔬中常见的产毒真菌及真菌毒素,因此,肉桂醛具有开发为果蔬保鲜剂的潜力。Wang 等^[19]的研究表明,柠檬醛对交链孢菌生长产毒的抑制效果优于肉桂醛,且呈剂量效应,进一步机制研究发现柠檬醛可通过破坏交链孢菌的细胞完整性,紊乱其活性氧平衡,以及直接抑制 AOH、AME 等交链孢毒素生物合成基因的表达等方式抑制交链孢毒素的产生。

植物精油种类繁多,活性成分组成复杂,其抑菌

表2 部分对真菌生长和真菌毒素累积同时具有抑制作用的植物精油及活性成分

Table 2 Essential oils and their active components that simultaneously inhibit the growth of fungi and accumulation of mycotoxins

植物精油/ 活性成分	抑制真菌/真菌毒素	效果	参考文献
丁香精油	寄生曲霉/AFs	培养基中0.2 μL/mL的丁香精油可完全抑制寄生曲霉产生AFs	[12]
	黑曲霉、炭黑曲霉/OTA	条件培养基中, 1500 μL/L的丁香精油可有效抑制黑曲霉和炭黑曲霉的生长及OTA的累积, 抑制作用与水分活度相关	[14]
	禾谷镰刀菌/ZEN, DON	500 μg/g的丁香精油可有效降低玉米中禾谷镰刀菌的生长及ZEN、DON的产生, 抑制作用与温度和水分活度相关	[20]
	串珠镰刀菌/FB ₁	培养基中1 μL/mL的丁香精油可使FB ₁ 产量降低69%, 2 μL/mL丁香精油可使FB ₁ 产量降低78%	[12]
	桔青霉/桔青霉素citrinin	培养基中1.6 mg/mL的丁香精油对桔青霉生长和桔青霉素产生的抑制率分别为80%和58%	[21]
牛至精油	赭曲霉/OTA	培养基中, 1000 μL/mL的牛至精油可在21 d内完全抑制赭曲霉的生长和OTA的产生	[22]
	禾谷镰刀菌/ZEN, DON	500 μg/g的牛至精油可有效降低玉米中禾谷镰刀菌的生长及ZEN、DON的产生, 抑制作用与温度和水分活度相关	[20]
	鲜绿青霉/OTA	培养基中0.0625 mg/mL的牛至精油在14~21 d内, 对菌生长的抑制率为21%~37%, 对OTA的抑制率为72.6%~97.9%	[23]
肉桂精油	黄曲霉/AFB ₁	20 d培养期内, 玉米渣中水分含量为13%和21%时, 抑制率分别为98.94%和83.53%	[24]
	禾谷镰刀菌/ZEN, DON	500 μg/g的肉桂精油可有效降低玉米中禾谷镰刀菌的生长及ZEN、DON的产生, 抑制作用与温度和水分活度相关	[20]
百里香精油	黄曲霉/AFB ₁ , AFB ₂	培养基中250 μg/mL的百里香精油可完全抑制黄曲霉生长, 浓度为150 μg/mL时可完全抑制AFB ₁ 和AFB ₂ 的产生	[25]
	黄曲霉/AFB ₁	0.7 μL/mL的百里香精油对黄曲霉的菌丝生长有明显的抑制作用, 浓度为0.6 μL/mL时可完全抑制AFB ₁ 的产生	[26]
生姜精油	禾谷镰刀菌/DON	培养基中1×10 ⁶ μg/L的生姜精油可抑制禾谷镰刀菌的生长, 浓度为5×10 ⁵ μg/L时可抑制DON的产生	[27]
	轮枝镰刀菌/FB ₁ , FB ₂	培养基中2.5×10 ⁶ μg/L的生姜精油可完全抑制轮枝镰刀菌的生长, 4×10 ⁶ 和2×10 ⁶ μg/L的生姜精油可完全抑制FB ₁ 和FB ₂ 的产生	[28]
姜黄精油	禾谷镰刀菌/ZEN	培养基中姜黄精油浓度为3.5×10 ⁶ 和3×10 ⁶ μg/L时可分别完全抑制禾谷镰刀菌生长和ZEN的产生	[29]
	轮枝镰刀菌/FB ₁ , FB ₂	培养基中7.37×10 ⁴ μg/L的姜黄精油可完全抑制轮枝镰刀菌的生长, 浓度为2.5×10 ⁵ μg/L时能极大地抑制FB ₁ 和FB ₂ 的产生	[30]
迷迭香精油	黄曲霉/AFB ₁ , AFB ₂	5×10 ⁵ μg/L的迷迭香精油可有效抑制黄曲霉的生长, 浓度为5×10 ⁴ μg/L时可抑制AFB ₁ 和AFB ₂ 的产生	[31]
圣罗勒精油	黄曲霉/AFB ₁	选择性培养基中, 圣罗勒精油最低抑菌浓度为0.3 μL/mL, 0.2 μL/mL时即可完全抑制AFB ₁ 的产生	[32]
山苍子精油	黄曲霉/AFB ₁	山苍子精油主要成分柠檬醛对黄曲霉的最低抑菌浓度为0.1%, 花生蔡氏培养基中, 0.1%柠檬醛使黄曲霉毒素的产生减少85%	[33]
来檬精油	黄曲霉/AFB ₁ , AFG ₁	1000 μg/mL的来檬精油可有效抑制黄曲霉的生长和AFB ₁ 、AFG ₁ 的产生	[34]
花椒精油	黄曲霉/AFB ₁	培养基中1.25 μL/mL的花椒精油可完全抑制黄曲霉的生长及AFB ₁ 的产生	[35]
藿香蓟精油	寄生曲霉/AFs	0.75 mg/mL的藿香蓟精油可完全抑制寄生曲霉的生长, 并能抑制84%以上黄曲霉毒素的产生	[36]
波尔多精油	黑曲霉、炭黑曲霉/OTA	条件培养基中, 2000~3000 μL/L的波尔多精油可完全抑制黑曲霉生长和OTA产生, 抑制作用与水分活度相关	[14]
<i>poleo</i> 精油	黑曲霉、炭黑曲霉/OTA	条件培养基中, 1500 μL/L的 <i>poleo</i> 精油可有效抑制黑曲霉和炭黑曲霉的生长及OTA的累积, 抑制作用与水分活度相关	[14]
薄荷精油	赭曲霉/OTA	1000 μL/mL的薄荷精油可在21 d内完全抑制赭曲霉的生长和OTA的产生	[22]
罗勒精油	赭曲霉/OTA	1000 μL/mL的罗勒精油在7 d内可完全抑制赭曲霉的生长和OTA的产生, 低于此浓度, 抑制率显著下降	[22]
茴芹精油	赭曲霉/OTA	500 μL/mL茴芹精油可完全抑制赭曲霉生长, 0.1%茴芹精油可完全抑制小麦中OTA的产生	[37]
玫瑰草精油	禾谷镰刀菌/ZEN, DON	500 μg/g的玫瑰草精油可有效降低玉米中禾谷镰刀菌的生长及ZEN、DON的累积, 抑制作用与温度和水分活度相关	[20]
柠檬草精油	禾谷镰刀菌/ZEN, DON	500 μg/g的柠檬草精油可有效降低玉米中禾谷镰刀菌的生长及ZEN、DON的累积, 抑制作用与温度和水分活度相关	[20]
蓝桉精油	日耳曼青霉, 疣孢青霉/OTA	培养基中15 μL/mL蓝桉精油可完全抑制日耳曼青霉的生长, 对疣孢青霉生长的抑制率为77.52%, 可完全抑制OTA的产生	[38]
印楝精油	日耳曼青霉, 疣孢青霉/OTA	培养基中15 μL/mL的印楝精油可完全抑制日耳曼青霉的生长, 对疣孢青霉生长的抑制率为92.49%, 可完全抑制OTA的产生	[38]
丁香酚	黄曲霉/AFB ₁	20 d培养期内, 玉米渣中水分含量为13%和21%时, 抑制率分别为78.79%和64.1%	[24]
		选择性培养基中, 0.2 μL/mL的丁香酚可完全抑制菌的生长, 0.1 μL/mL丁香酚可完全抑制AFB ₁ 的产生	[32]
	炭黑曲霉/OTA	培养基中0.8 μL/mL的丁香酚可完全抑制炭黑曲霉的生长, 0.4 μL/mL丁香酚可几乎完全抑制AFB ₁ 的产生	[39]
	禾谷镰刀菌/DON	20 d培养期内, 玉米渣中水分含量为13%和21%时, 丁香酚对DON产生的抑制率达75.7%和98.33%。	[24]
	黄色镰刀菌/DON	培养基中丁香酚可有效抑制黄色镰刀菌生长, 90%有效抑菌浓度为0.395 mL/L, DON的产生受到明显抑制	[40]

续表 2

植物精油/ 活性成分	抑制真菌/真菌毒素	效果	参考文献
柠檬醛	黄曲霉/AFB ₁	培养基中柠檬醛对黄曲霉的最小抑制浓度为0.15%, 0.1%柠檬醛可使AFB ₁ 的产生减少81%	[41]
	赭曲霉/OTA	培养基中250 μL/L柠檬醛可完全抑制赭曲霉生长, 75 μg/mL柠檬醛可完全抑制OTA的产生	[13]
	禾谷镰刀菌/DON	20 d培养期内, 玉米渣中水分含量为13%和21%时, 柠檬醛对DON产生的抑制率为67.42%和95.64%	[24]
百里香酚	互隔交链孢菌/AOH, AME	0.25 μL/mL柠檬醛可完全抑制互隔交链孢菌生长, 0.125 μL/mL柠檬醛可几乎完全抑制AOH、AME的产生	[19]
	黄色镰刀菌/DON	培养基中百里香酚可有效抑制黄色镰刀菌生长, 90%有效抑菌浓度为 0.305 mL/L, DON的产生受到明显抑制	[40]
香芹酚	轮枝镰刀菌/FB ₁	培养基中500 μL/L百里香酚可完全抑制菌生长, 83 μL/kg百里香酚可有效抑制玉米中FB ₁ 的产生	[42]
	鲜绿青霉/OTA	百里香酚浓度为0.0625 mg/mL时, 21 d内可完全抑制鲜绿青霉的生长和OTA的产生	[23]
肉桂醛	黄曲霉、寄生曲霉/AFs	香芹酚可抑制黄曲霉及寄生曲霉的生长, 下调黄曲霉毒素合成相关基因的表达, 对黄曲霉毒素的抑制率超过60%	[43]
	鲜绿青霉/OTA	14-21 d内, 香芹酚浓度为0.1953 μL/mL时, 对鲜绿青霉生长的抑制率为42.1%~98.3%, 17 d内对OTA产生的抑制率为100%	[23]
橙花醇	赭曲霉/OTA	培养基中150 μL/L天然肉桂醛和250 μL/L合成肉桂醛可完全抑制赭曲霉生长, 100 μg/mL时几乎完全抑制OTA产生	[13]
	互隔交链孢菌/AOH, AME	200 μL/L肉桂醛可有效抑制互隔交链孢菌的生长及AOH、AME的产生	[18]
柠檬烯	黄曲霉/AFB ₁	培养基中接触和熏蒸条件下, 0.8 μL/mL和0.1 μL/mL橙花醇可完全抑制黄曲霉的生长, 0.6 μL/mL橙花醇可完全抑制AFB ₁ 的产生	[44]
柠檬烯	轮枝镰刀菌/FB ₁	培养基中1000 μL/L柠檬烯和薄荷醇可完全抑制轮枝镰刀菌生长, 83 μL/kg柠檬烯可有效抑制玉米中FB ₁ 的产生	[42]

注: 丁香精油: *Syzygium aromaticum* L. EO; 牛至精油: *Origanum vulgare* L. EO; 肉桂精油: Cinnamon EO; 百里香精油: *Thymus vulgaris* EO; 生姜精油: *Zingiber officinale* EO; 姜黄精油: *Curcuma longa* EO; 迷迭香精油: *Rosmarinus officinalis* EO; 圣罗勒精油: *Ocimum sanctum* EO; 山苍子精油: *Litsea cubeba* EO; 来檬精油: *Citrus aurantifolia* EO; 花椒精油: *Zanthoxylum alatum* Roxb. EO; 藜香蓟精油: *Ageratum conyzoides* L. EO; 波尔多精油: *Péumus boldus* Mol. EO; poleo 精油: *Lippia turbinata* var. *integrifolia* (Griseb.) EO; 薄荷精油: *Menta arvensis* EO; 罗勒精油: *Ocimum basilicum* EO; 茵芹精油: *Pimpinella anisum* EO; 玫瑰草精油: *Cymbopogon martinii* EO; 柠檬草精油: Lemongrass EO; 蓝桉精油: *Eucalyptus globules* EO; 印楝精油: *Azadirachta indica* EO; 丁香酚: eugenol; 柠檬醛: Citral; 百里香酚: thymol; 香芹酚: Carvacrol; 肉桂醛: Cinnamaldehyde; 橙花醇: Nerol; 柠檬烯: limonene; 黄曲霉: *Aspergillus flavus*; 赭曲霉: *Aspergillus ochraceus*; 寄生曲霉: *Aspergillus parasiticus*; 黑曲霉: *Aspergillus niger*; 炭黑曲霉: *Aspergillus carbonarius*; 禾谷镰刀菌: *Fusarium graminearum*; 串珠镰刀菌: *Fusarium moniliforme*; 轮枝镰刀菌: *Fusarium verticillioides*; 黄色镰刀菌: *Fusarium culmorum*; 桔青霉: *Penicillium citrinum*; 鲜绿青霉: *Penicillium verrucosum*; 日耳曼青霉: *Penicillium nordicum*; 疣孢青霉: *Penicillium verrucosum*; 鲜绿青霉: *Penicillium verrucosum*; 互隔交链孢菌: *Alternaria alternata*; AFB₁: 黄曲霉毒素B₁(aflatoxin B₁); AFB₂: 黄曲霉毒素B₂(aflatoxin B₂); AFG₁: 黄曲霉毒素G₁(aflatoxin G₁); AFG₂: 黄曲霉毒素G₂(aflatoxin G₂); AFs: AFB₁, AFB₂, AFG₁, AFG₂; ZEN: 玉米赤霉烯酮(zearelenone); DON: 脱氧雪腐镰刀菌烯醇(deoxynivalenol), 又称呕吐毒素; OTA: 赭曲霉毒素A(ochratoxin A); FB₁: 伏马菌素B₁(fumonisin B₁); FB₂: 伏马菌素B₂; citrinin: 桔霉素; AOH: 交链孢酚(alternariol); AME: 交链孢酚单甲醚(alternariol monomethyl ether)。

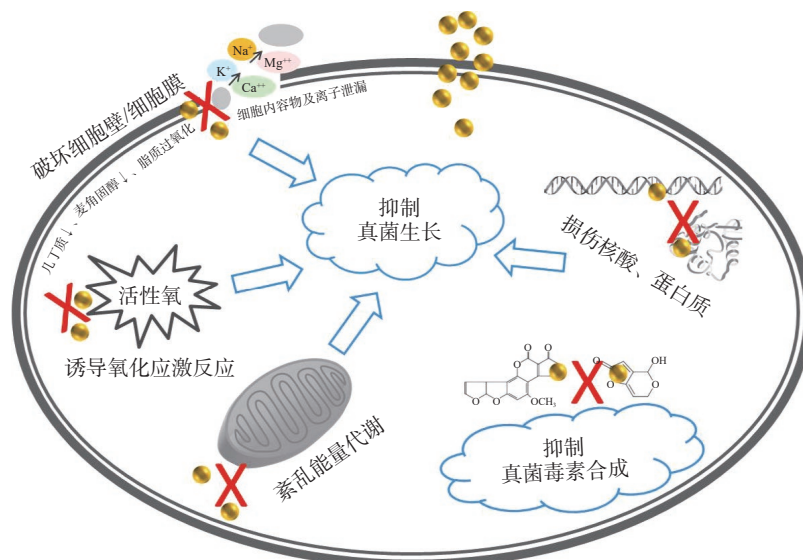


图 1 植物精油及其活性成分抑制真菌生长产毒的可能作用机制示意图

Fig.1 Schematic diagram of the possible antifungal and antitoxigenic mechanism of essential oils and their active components

机制及靶点目前尚未完全明确。近年来已有较多分子水平的证据证实植物精油及其活性成分可通过调控相关基因的表达水平而影响真菌毒素的产生, 但与蛋白结构性质相关联的综合分析报道较少, 随着分子生物学技术的发展, 植物精油及其活性成分抑制真菌

生长产毒的机制将得到进一步的阐明。

2.2 降解真菌毒素

除了通过抑制真菌毒素产生降低真菌毒素污染水平外, 某些植物精油及其活性成分对黄曲霉毒素等真菌毒素还具有降解效果。研究表明, 将山苍子

(*Litsea cubeba*)精油的有效成分柠檬醛滴加入黄曲霉毒素标准液中,能迅速破坏 AFB₁,说明柠檬醛具有降解黄曲霉毒素的效果^[45]。利用白芍等中草药熏蒸 AFB₁ 含量为 50 g/kg 的大米,可使大米中 AFB₁ 的荧光全部消失,说明中草药中的挥发性物质对 AFB₁ 具有降解作用^[46]。另外还有研究还发现,竹芋(*Maranta arundinacea*)精油具有降解 OTA 的效果,浓度为 500 mg/kg 的竹芋精油对可可粉中 OTA 的降解率超过 66.7%;竹芋精油浓度为 2000 mg/kg 时,可完全降解样品中的 OTA 毒素^[47]。袁媛^[48]研究发现肉桂精油和山苍子精油对 AFB₁ 具有降解作用,且肉桂精油的降解效果优于山苍子精油,60 mg 肉桂精油可将 20 g 玉米中 49.79 μg/kg 的 AFB₁ 降解至 27.9 μg/kg,降解率为 43.96%,相同条件下山苍子精油的降解率为 15.02%,明确了影响 AFB₁ 降解率的因素依次为精油用量、熏蒸时间和熏蒸温度,最佳熏蒸条件下肉桂精油对 AFB₁ 的降解率可达 64.5%。目前关于植物精油及其活性成分降解真菌毒素的研究相对较少,作用机制尚不清楚。

3 植物精油及其活性成分纳米制剂

植物精油及其活性成分因其来源天然丰富、抑菌防腐、安全高效等优点在食品工业中的应用越来越广泛,近年来,植物精油高效利用方法的研究受到越来越广泛的关注^[49]。利用纳米技术将植物精油及其活性成分进行包封或修饰,制备成纳米级制剂,不仅可改善植物精油及其活性物质稳定性差、溶解性差及易挥发等弊端,还可提高其分散性和比表面积,增加与真菌细胞接触面积及转运效率,提高其生物学活性,增强其防控真菌及真菌毒素的效力;另外,某些包封材料具有抑菌活性,包封植物精油及其活性成分后可增强其抑菌效果^[4,50]。目前已报道的可应用于真菌毒素防控的植物精油纳米制剂主要包括纳米颗粒/胶囊(nanoparticle/nanocapsule)、纳米乳(nanoemulsion)和纳米凝胶(nanogel)等,包封材料主要包括壳聚糖(chitosan)、卵磷脂(lecithin)、Tween 80、牛血清白蛋白(BSA)、乳清蛋白(whey protein)、海藻酸钠(sodium alginate)等(表 3)。

3.1 纳米颗粒

纳米颗粒是借助于高分子聚合技术,利用天然或合成的高分子材料(壁材)包封目标物质(芯材),形成的一种纳米尺寸级的“核-壳”型结构的固体球状粒子,植物精油及其活性成分被包封为纳米颗粒后具有更大的比表面积,能够增强与细胞间的相互作用,其良好的稳定性、水溶性、靶向性和缓释作用能够有效提高植物精油及其活性成分的生物利用度^[51]。目前已报道的应用于真菌毒素防控的植物精油及其活性成分纳米颗粒主要以壳聚糖为壁材进行包封(表 3),如 Dwivedy 等^[52]在明确了八角茴香(*Illicium verum*)精油对黄曲霉生长及 AFB₁ 产生具有显著抑制作用的基础上,以壳聚糖为壁材、八角茴香精油为芯材制

备了八角茴香精油纳米颗粒(直径<200 nm),实验结果表明,纳米颗粒降低了八角茴香精油的挥发性,提高了八角茴香精油的稳定性和利用率,增强了八角茴香精油防控黄曲霉和 AFB₁ 的效力。黄曲霉的最小抑制浓度(minimum inhibitory concentration, MIC)由 0.7 μL/mL 降至 0.3~0.4 μL/mL, AFB₁ 的最小抑制浓度由 0.5 μL/mL 降至 0.2 μL/mL,这可能与纳米颗粒具有较大的比表面积、可增加被动细胞吸收,降低传质阻力,从而提高了八角茴香精油的功效有关。Kalagatu 等^[53]在明确了玫瑰草(*Cymbopogon martinii*)精油可通过影响细胞内活性氧水平、脂质过氧化,降低麦角固醇含量诱导真菌死亡的基础上,将玫瑰草精油包封入壳聚糖,制备成玫瑰草精油纳米颗粒,该纳米颗粒对玉米中禾谷镰刀菌的生长和产毒具有显著的抑制作用,700 μg/g 的玫瑰草精油纳米颗粒可完全抑制禾谷镰刀菌的生长和 DON、ZEN 等真菌毒素的产生,而游离的玫瑰草精油完全抑制禾谷镰刀菌的生长和产毒(浓度需达到 900 μg/g),这可能与玫瑰草精油纳米颗粒稳定性好、抑菌成分可控释放有关。

3.2 纳米乳

纳米乳是两种不混溶的液体在动力学上稳定的均相分散体系,一种液体分散在另一种液体中,由乳化剂或表面活性剂稳定,形成水包油或油包水型乳剂,外观透明或半透明状,其细小的粒径可克服存储过程中产生的絮凝和沉降问题,有助于增强纳米乳这一动力学稳定体系^[54-55]。植物精油纳米乳可提高植物精油的水溶性、稳定性、缓释性和生物利用度。如 Wan 等^[54]制备了百里香精油、柠檬草精油、肉桂精油、薄荷精油和丁香精油等 5 种精油的纳米乳,以禾谷镰刀菌为例,评估了纳米乳包封和未包封植物精油抑制水稻籽粒中产毒真菌生长和 DON、3-乙酰基脱氧雪腐镰刀菌烯醇(3-acetyl deoxynivalenol, 3-AcDON)、15-AcDON 等 3 种真菌毒素的活性,结果显示精油纳米乳在浓度为 1250 μg/g 时可完全抑制真菌毒素的产生,推测纳米乳体系有助于提高植物精油的溶解度,从而显著增强了植物精油纳米乳对真菌毒素累积的抑制活性。冯文旭等^[55]以卵磷脂作为乳化剂,添加中链甘油三酯(medium chain triglycerides, MCT)作为奥氏熟化抑制剂制备了丁香精油、肉桂精油、牛至精油和山苍子精油的纳米乳,并考察了以上纳米乳对禾谷镰刀菌生长产毒的抑制作用,结果表明,四种精油纳米乳均展现出较好的储存稳定性,对禾谷镰刀菌的生长具有不同程度的抑制作用,其中 40 mg/g 的肉桂精油纳米乳对禾谷镰刀菌的菌丝抑制率为 66.2%,大麦培养基中产毒实验结果表明,4 种纳米乳对禾谷镰刀菌产生 DON 和 15-AcDON 均具有较好的抑制作用,其中肉桂精油纳米乳抑制毒素产生的效果最好,浓度为 0.3 mg/g 时对 DON 和 15-AcDON 的抑制率分别高达 98.8% 和 96.6%,其次为丁香精油纳米乳、牛至精油纳米乳和山苍子精油纳米乳。

表 3 部分对产毒真菌及真菌毒素同时具有抑制作用的植物精油纳米制剂

Table 3 Nanoformulations of essential oils and their active components that simultaneously inhibit the growth of fungi and accumulation of mycotoxins

载体系统	精油/活性物质	封装材料	真菌/真菌毒素	效果	参考文献
纳米颗粒/胶囊	八角茴香精油	壳聚糖	黄曲霉/AFB ₁	封装后的八角茴香精油对AFB ₁ 产生的MIC由0.5 μL/mL降至0.2 μL/mL	[52]
	肉豆蔻精油	壳聚糖	黄曲霉/AFB ₁	封装后的肉豆蔻精油对黄曲霉生长的MIC由2.75 μL/mL降至1.75 μL/mL, 1.0 μL/mL肉豆蔻精油纳米颗粒可完全抑制AFB ₁ 的产生	[58]
	牛至精油	壳聚糖	黄曲霉/AFB ₁	封装后的牛至精油对黄曲霉生长和AFB ₁ 产生的MIC分别由2.5 μL/mL和1.5 μL/mL均降至1.0 μL/mL	[59]
	圣罗勒精油	壳聚糖	黄曲霉/AFB ₁	封装后的圣罗勒精油对黄曲霉生长和AFB ₁ 产生的MIC由300 μL/L和200 μL/L分别降至60 μL/L和30 μL/L	[60]
	茴芹精油	壳聚糖	黄曲霉/AFB ₁	封装后的茴芹精油对黄曲霉生长和AFB ₁ 产生的MIC分别由0.5 μL/mL和0.4 μL/mL降至0.08 μL/mL和0.07 μL/mL	[61]
	芫荽精油	壳聚糖	黄曲霉/AFB ₁	封装后芫荽精油的防控黄曲霉及AFB ₁ 的效力增强, 完全抑制黄曲霉生长和产毒的浓度为0.5 μL/mL和0.4 μL/mL, 远低于游离精油	[62]
	加州胡椒精油	壳聚糖	寄生曲霉/AFs	500 μg/mL未封装加州胡椒精油对AFs产生的抑制率为43%, 封装为纳米颗粒后对AFs产生的抑制率升高至59%	[63]
	玫瑰草精油	壳聚糖	禾谷镰刀菌/DON, ZEN	封装后玫瑰草精油对禾谷镰刀菌生长和DON、ZEN产生的MIC由900 μg/g降至700 μg/g	[53]
	丁香酚	壳聚糖	黄曲霉/AFB ₁	封装后的丁香酚对黄曲霉生长和AFB ₁ 产生的MIC分别由0.5 μL/mL和0.3 μL/mL降至0.07 μL/mL和0.06 μL/mL	[64]
	α-松油醇	壳聚糖	黄曲霉/AFB ₁	封装后的α-松油醇对黄曲霉生长和AFB ₁ 产生的MIC分别由0.9 μL/mL和0.5 μL/mL降至0.4 μL/mL和0.3 μL/mL	[65]
纳米乳	茴香脑	壳聚糖	黄曲霉/AFB ₁	封装后的茴香脑对黄曲霉生长和AFB ₁ 产生的MIC分别由1.2 μL/mL和0.8 μL/mL降至0.8 μL/mL和0.4 μL/mL	[66]
		BSA或Tween 80或quillaja saponins	禾谷镰刀菌/DON	1.5 mg/g丁香精油纳米乳可有效抑制大麦中禾谷镰刀菌的生长和DON的产生; Tween 80稳定的丁香精油纳米乳具有较高的DON抑制活性	[67]
	丁香精油	Tween 80/MCT	禾谷镰刀菌/DON, 3-AcDON, 15-AcDON	1250 μg/g丁香精油纳米乳可完全抑制水稻中DON、3-AcDON和15-AcDON的产生, 效果优于未封装精油	[54]
		卵磷脂/MCT	禾谷镰刀菌/DON, 15-AcDON	1.5 mg/g丁香精油纳米乳对DON和15-AcDON产生的抑制率分别为98.8%和99.8%	[55]
		乳清蛋白	层出镰刀菌/FB ₁ , FB ₂	丁香精油纳米乳可有效抑制玉米中FB ₁ 和FB ₂ 的产生	[68]
		卵磷脂/MCT/壳聚糖	禾谷镰刀菌/DON, 3-AcDON	218 μg/g的肉桂精油纳米乳可完全抑制大米中DON和3-AcDON的产生, 0.1 wt%壳聚糖的加入可将肉桂精油对禾谷镰刀菌菌丝生长的抑制率提高38.1%	[69]
	肉桂精油	Tween 80/MCT	禾谷镰刀菌/DON, 3-AcDON, 15-AcDON	1250 μg/g肉桂精油纳米乳可完全抑制水稻中DON、3-AcDON和15-AcDON的产生, 效果优于未封装精油	[54]
		卵磷脂/MCT	禾谷镰刀菌/DON, 15-AcDON	0.3 mg/g肉桂精油纳米乳对禾谷镰刀菌中麦角固醇生成的抑制率为34.81%, 对DON和15-AcDON产生的抑制率分别为98.8%和96.6%	[55]
	牛至精油	卵磷脂/MCT	禾谷镰刀菌/DON, 15-AcDON	1.5 mg/g牛至精油纳米乳对DON和15-AcDON产生的抑制率分别为93.9%和99.7%	[55]
	山苍子精油	卵磷脂/MCT	禾谷镰刀菌/DON, 15-AcDON	1.5 mg/g山苍子精油纳米乳对禾谷镰刀菌中麦角固醇生成的抑制率为41.7%, 对DON和15-AcDON产生的抑制率分别为99.3%和96.1%	[55]
纳米凝胶	黑孜然精油	壳聚糖/肉桂酸	黄曲霉/AFB ₁	封装后黑孜然精油对黄曲霉生长和AFB ₁ 产生的MIC均由0.5 μL/mL降至0.3 μL/mL	[57]
	肉豆蔻精油	壳聚糖/肉桂酸	黄曲霉/AFB ₁	封装后的肉豆蔻精油对黄曲霉生长和AFB ₁ 产生的MIC均由1.5 μL/mL降至1.25 μL/mL	[70]
	香叶天竺葵精油	壳聚糖/肉桂酸	黄曲霉/AFB ₁	封装后的香叶天竺葵精油对黄曲霉生长和AFB ₁ 产生的MIC均由1.25 μL/mL降至1.0 μL/mL	[71]
	罗勒复配精油	壳聚糖/肉桂酸	黄曲霉/AFB ₁	封装后复配精油对黄曲霉生长和AFB ₁ 产生的MIC由0.6 μL/mL和0.5 μL/mL分别降至0.3 μL/mL和0.2 μL/mL	[72]
	百里香酚/肉桂酸甲酯/芳樟醇	壳聚糖/肉桂酸	黄曲霉/AFB ₁	封装后0.3 μL/mL和0.2 μL/mL的复配精油活性成分纳米凝胶可分别完全抑制真菌生长和AFB ₁ 的产生, 效果优于未封装的精油单剂和复配制剂	[73]

注: 八角茴香精油: *Illicium verum* EO; 肉豆蔻精油: *Myristica fragrans* EO; 芫荽精油: *Coriandrum sativum* L. EO; 加州胡椒精油: *Schinus molle* EO黑孜然精油: *Bunium persicum* EO; 罗勒复配精油: *Ocimum* spp. EO (O. sanctum:O. basilicum:O. canum=4:1:1); α-松油醇: α-terpineol; 茴香脑: anethole; 芳樟醇: linalool; 层出镰刀菌: *Fusarium proliferatum*; 3-AcDON: 3-乙酰基脱氧雪腐镰刀菌烯醇(3-acetyl deoxynivalenol); 15-AcDON: 15-乙酰基脱氧雪腐镰刀菌烯醇; NIV: 雪腐镰刀菌烯醇(nivalenol); HT-2: HT-2毒素; T-2: T-2毒素; MCT: 中链甘油三酯(medium chain triglycerides); MIC: 最小抑制浓度(minimum inhibitory concentration); 其余同表2。

3.3 纳米凝胶

纳米凝胶本体是水凝胶,是由带相反电荷的分子在纳米范围(通常<200 nm)内以化学键或物理交联作用形成的三维网状亲水性聚合物,可作为植物精油等具有生物活性成分的载体系统^[56]。近年来,利用肉桂酸或肉桂酸类衍生物对壳聚糖进行改性,制备成壳聚糖基纳米凝胶^[57],具有含水量高、稳定性好、比表面积大等特点,包封植物精油及其活性成分后可提高其稳定性及生物利用度,增强其防控真菌及真菌毒素的效力(表3)。目前植物精油及其活性成分纳米凝胶可用于真菌毒素防控的研究主要集中在黄曲霉毒素的防控上,如Yadav等^[57]采用壳聚糖-肉桂酸纳米凝胶包封黑孜然(*Bunium persicum*)精油,研究了包封前后黑孜然精油防控黄曲霉和AFB₁的效力,结果表明,黑孜然精油纳米凝胶具有较好的热稳定性,游离和包封的黑孜然精油对黄曲霉生长和AFB₁产生的最小抑制浓度分别为0.5 μL/mL和0.3 μL/mL,且黑孜然精油纳米凝胶具有更强的清除自由基的能力,说明黑孜然精油纳米凝胶具有更高的抗真菌、抗AFB₁及抗氧化的能力,这可能与孜然精油纳米凝胶具有更大的比表面积、可控和靶向释放以及精油与壳聚糖之间存在协同抑制作用有关;进一步的研究发现,黑孜然精油纳米凝胶可通过破坏细胞膜的完整性导致菌体死亡进而导致AFB₁累积量减少,也可能与杂色曲霉毒素A脱氢酶基因(*ver-1*)等黄曲霉毒素生物合成相关基因相互作用,直接抑制AFB₁的生物合成;因此,黑孜然精油纳米凝胶可用于农产品及其制品中黄曲霉及黄曲霉毒素的防控,提高其的货架期及安全性。

综上所述,植物精油纳米制剂作为一种新型高效的真菌及真菌毒素抑制剂,其低剂量使用减少了其作为食品防腐剂对消费者的可能风险,在食品中真菌及真菌毒素防控方面具有良好的应用前景。

4 展望

植物精油作为一种绿色安全的抑菌剂已逐渐成为国内外研究的热点,近年来,植物精油防控真菌毒素的相关研究主要集中于机制解析和开发应用上。在机制解析方面,植物精油及其活性成分抑制真菌生长产毒的作用方式通常是多靶点、多途径,在分子水平上研究植物精油及其活性成分对产毒真菌转录翻译及代谢过程的影响将有助于深入解析其作用机制。另外,精油成分复杂,目前一种植物精油或单一活性成分抑制真菌生长产毒作用机制的报道较多,而不同植物精油活性成分之间的协同作用相关研究较少,对不同精油活性成分之间协同作用效果及机制的研究将为未来抗真菌制剂的研发提供新的思路。应用方面,纳米制剂的研发为提高植物精油及其活性成分的生物利用度提供了思路,也取得了一定的进展,但也存在一些亟需解决的问题,如目前将植物精油及其活性成分包封为纳米制剂用于真菌毒素防控

的研究主要集中于AFB₁、DON等少数真菌毒素,其它真菌毒素相对较少,鉴于农产品易被多种真菌毒素混合污染,植物精油及其活性成分纳米制剂应用于多种真菌毒素的研究结果将更具有理论参考价值;其次,纳米制剂的作用机制和安全性有待进一步的研究,以及时了解和应对其潜在风险,满足食品工业和消费者对抑菌防腐剂绿色安全高效的需求;另外,同一纳米载体系统对不同精油生物活性的作用可能不同,因此,包封材料的选择及纳米载体系统的设计对于开发天然、高效、稳定的真菌毒素抑制剂具有重要意义,不同植物精油与纳米载体系统作用方式及其在不同基质和环境中的动力学规律和释放机制的研究将为可应用于植物精油的纳米载体系统的筛选和应用提供参考;此外,目前纳米制剂成本相对昂贵,积极研发安全环保、价格低廉的纳米技术和载体系统,是降低植物精油纳米制剂生产成本,实现其工业化生产的重要举措。随着纳米技术的不断发展及人们对植物精油等天然绿色植物提取物的逐渐重视和高需求,植物精油及其活性成分纳米制剂将具有更广阔的开发潜力和应用前景。

参考文献

- [1] MARIN S, RAMOS A J, CANO-SANCHO G, et al. Mycotoxins: occurrence, toxicology, and exposure assessment[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2013, 60: 218–237.
- [2] VAN EGMOND H P, JONKER M A. Worldwide regulations for mycotoxins in food and feed in 2003[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2004.
- [3] REDONDO-BLANCO S, FERNÁNDEZ J, LOPEZ-IBANEZ S, et al. Plant phytochemicals in food preservation: antifungal bioactivity: A review[J]. *Journal of Food Protection*, 2020, 83(1): 163–171.
- [4] CHAUDHARI A K, DWIVEDI A K, SINGH V K, et al. Essential oils and their bioactive compounds as green preservatives against fungal and mycotoxin contamination of food commodities with special reference to their nanoencapsulation[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(25): 25414–25431.
- [5] 牛小杰, 孙鲁阳. 植物精油化学成分的研究进展[J]. *生物工程*, 2021, 7(5): 160–162. [NIU Xiaojie, SUN Luyang. Research progress on chemical constituents of plant essential oil[J]. *Biological Chemical Engineering*, 2021, 7(5): 160–162.]
- [6] BASSOLÉ I H N, JULIANI H R. Essential oils in combination and their antimicrobial properties[J]. *Molecules*, 2012, 17(4): 3989–4006.
- [7] 王利敏, 邢福国, 吕聪, 等. 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. [WANG Limin, XING Fuguo, LÜ Cong, et al. Study on the anti-mould and anti-mycotoxins effects of combined essential oils in maize[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2018, 32(4): 732–739.]
- [8] JAYASENA D D, JO C. Essential oils as potential antimicrobial agents in meat and meat products: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2013, 34(2): 96–108.
- [9] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 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. [National Health and Family Planning Commis-

- sion of People's Republic of China. GB/2760-2014 National standard for food safety standards of using food additives[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.]
- [10] TONGNUANCHAN P, BENJAKUL S. Essential oils: Extraction, bioactivities, and their uses for food preservation[J]. *Journal of Food Science*, 2014, 79(7): R1231-R1249.
- [11] NAZZARO F, FRATIANNI F, COPPOLA R, et al. Essential oils and antifungal activity[J]. *Pharmaceuticals*, 2017, 10(4): 86.
- [12] JUGLAL S, GOVINDEN R, ODHAV B. Spice oils for the control of co-occurring mycotoxin-producing fungi[J]. *Journal of Food Protection*, 2002, 65(4): 683-687.
- [13] HUA H, XING F, SELVARAJ J N, et al. Inhibitory effect of essential oils on *Aspergillus ochraceus* growth and ochratoxin A production[J]. *Plos One*, 2014, 9(9): e108285.
- [14] PASSONE M A, GIRARDI N S, ETCHEVERRY M. Evaluation of the control ability of five essential oils against *Aspergillus section Nigri* growth and ochratoxin A accumulation in peanut meal extract agar conditioned at different water activities levels[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2012, 159(3): 198-206.
- [15] 鞠健. 丁香酚和柠檬醛对萎地青霉和黑曲霉的协同抑菌机理探究[D]. 无锡: 江南大学, 2021. [JÜ Jian. Study on the synergistic inhibitory mechanism of eugenol and citral against *Penicillium roqueforti*[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.]
- [16] SUN Q, SHANG B, WANG L, et al. Cinnamaldehyde inhibits fungal growth and aflatoxin B₁ biosynthesis by modulating the oxidative stress response of *Aspergillus flavus*[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2016, 100: 1355-1364.
- [17] 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. [LIANG Dandan. Inhibitory effect essential oil on *Aspergillus flavus* growth and aflatoxin production in stored maize[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015.]
- [18] XU L, TAO N, YANG W, et al. Cinnamaldehyde damaged the cell membrane of *Alternaria alternata* and induced the degradation of mycotoxins *in vivo*[J]. *Industrial Crops and Products*, 2018, 112: 427-433.
- [19] WANG L, JIANG N, WANG D, et al. Effects of essential oil citral on the growth, mycotoxin biosynthesis and transcriptomic profile of *Alternaria alternata*[J]. *Toxins*, 2019, 11(10): 553.
- [20] MARIN S, VELLUTI A, RAMOS A J, et al. 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.
- [21] AIKO V, MEHTA A. Inhibitory effect of clove (*Syzygium aromaticum*) on the growth of penicillium citrinum and citrinin production[J]. *Journal of Food Safety*, 2013, 33(4): 440-444.
- [22] BASILICO M Z, BASILICO J C. Inhibitory effects of some spice essential oils on *Aspergillus ochraceus* NRRL 3174 growth and ochratoxin a production[J]. *Letters in Applied Microbiology*, 1999, 29(4): 238-241.
- [23] JERŠEK B, ULRIH N P, SKRT M, et al. Effects of selected essential oils on the growth and production of ochratoxin A by *Penicillium verrucosum*[J]. *Archives of Industrial Hygiene and Toxicology*, 2014, 65(2): 199-208.
- [24] 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. [YUAN Yuan, XING Fuguo, LIU Yang. Role of essential oils in the inhibition of fungal growth and mycotoxin accumulation[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2013, 27(8): 1168-1172.]
- [25] KOHIYAMA C Y, RIBEIRO M M Y, MOSSINI S A G, et al. Antifungal properties and inhibitory effects upon aflatoxin production of *Thymus vulgaris* L. by *Aspergillus flavus* Link[J]. *Food Chemistry*, 2015, 173: 1006-1010.
- [26] KUMAR A, SHUKLA R, SINGH P, et al. Assessment of *Thymus vulgaris* L. essential oil as a safe botanical preservative against post harvest fungal infestation of food commodities[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2008, 9(4): 575-580.
- [27] FERREIRA F M D, HIROOKA E Y, FERREIRA F D, et al. Effect of *Zingiber officinale* Roscoe essential oil in fungus control and deoxynivalenol production of *Fusarium graminearum* Schwabe *in vitro*[J]. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 2018, 35(11): 2168-2174.
- [28] YAMAMOTO-RIBEIRO M M G, GRESPLAN R, KOHIYAMA C Y, et al. Effect of *Zingiber officinale* essential oil on *Fusarium verticillioides* and fumonisin production[J]. *Food Chemistry*, 2013, 141(3): 3147-3152.
- [29] KUMAR K N, VENKATARAMANA M, ALLEN J A, et al. Role of *Curcuma longa* L. essential oil in controlling the growth and zearalenone production of *Fusarium graminearum*[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 69: 522-528.
- [30] AVANÇO G B, FERREIRA F D, BOMFIM N S, et al. *Curcuma longa* L. essential oil composition, antioxidant effect, and effect on *Fusarium verticillioides* and fumonisin production[J]. *Food Control*, 2017, 73: 806-813.
- [31] DA SILVA BOMFIM N, KOHIYAMA C Y, NAKASUGI L P, et al. Antifungal and antiaflatoxic activity of rosemary essential oil (*Rosmarinus officinalis* L.) against *Aspergillus flavus*[J]. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 2020, 37(1): 153-161.
- [32] KUMAR A, SHUKLA R, SINGH P, et al. Chemical composition, antifungal and antiaflatoxic activities of *Ocimum sanctum* L. essential oil and its safety assessment as plant based antimicrobial[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2010, 48(2): 539-543.
- [33] 余伯良, 罗惠波, 周健, 等. 山苍子油抗霉菌及抑制黄曲霉产毒的有效成分研究[J]. 四川轻化工学院学报, 2002, 14(1): 32-36. [YU Boliang, LUO Huibo, ZHOU Jian, et al. Study on the active ingredient of antibiotic activities of *Litsea cubeba* oil on moulds and the effect on aflatoxin production[J]. *Journal of Sichuan Institute of Light Industry and Chemical Technology*, 2002, 14(1): 32-36.]
- [34] RAZZAGHI-ABYANEH M, SHAMS-GHAHFAROKHI M, REZAEI M B, et al. Chemical composition and antiaflatoxic activity of *Carum carvi* L., *Thymus vulgaris* and *Citrus aurantifolia* essential oils[J]. *Food Control*, 2009, 20(11): 1018-1024.
- [35] PRAKASH B, SINGH P, MISHRA P K, et al. Safety assessment of *Zanthoxylum alatum* Roxb. essential oil, its antifungal, anti-aflatoxin, antioxidant activity and efficacy as antimicrobial in preservation of *Piper nigrum* L. fruits[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2012, 153(1-2): 183-191.
- [36] PATIL R P, NIMBALKAR M S, JADHAV U U, et al. Antiaflatoxic and antioxidant activity of an essential oil from *Ageratum conyzoides* L.[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2010, 90(4): 608-614.
- [37] SOLIMAN K M, BADEAA R I. Effect of oil extracted from some medicinal plants on different mycotoxinogenic fungi[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2002, 40(11): 1669-1675.
- [38] RAO V K, GIRISHAM S, REDDY S M. Inhibitory effect of essential oils on growth and ochratoxin A production by *Penicillium* species[J]. *Research Journal of Microbiology*, 2015, 10(5): 222.

- [39] JIANG N, WANG L, JIANG D, et al. Transcriptomic analysis of inhibition by eugenol of ochratoxin A biosynthesis and growth of *Aspergillus carbonarius*[J]. *Food Control*, 2022, 135: 108788.
- [40] MORCIA C, MALNATI M, TERZI V. *In vitro* antifungal activity of terpinen-4-ol, eugenol, carvone, 1, 8-cineole (eucalyptol) and thymol against mycotoxigenic plant pathogens[J]. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 2012, 29(3): 415–422.
- [41] 余伯良, 罗惠波. 柠檬醛抗真菌及抑制黄曲霉产毒的试验报告[J]. *食品科技*, 2002, 27(4): 47–49. [YU Boliang, LUO Huibo. Antimycosis and inhibition aflatoxin's production of citral[J]. *Food Science and Technology*, 2002, 27(4): 47–49.]
- [42] DAMBOLENA J S, LÓPEZ A G, CÁNEPA M C, et al. Inhibitory effect of cyclic terpenes (limonene, menthol, menthone and thymol) on *Fusarium verticillioides* MRC 826 growth and fumonisin B₁ biosynthesis[J]. *Toxicon*, 2008, 51(1): 37–44.
- [43] YIN H B, CHEN C H, KOLLANOOR-JOHN A, et al. Controlling *Aspergillus flavus* and *Aspergillus parasiticus* growth and aflatoxin production in poultry feed using carvacrol and trans-cinnamaldehyde[J]. *Poultry Science*, 2015, 94(9): 2183–2190.
- [44] TIAN J, ZENG X, ZENG H, et al. Investigations on the antifungal effect of nerol against *Aspergillus flavus* causing food spoilage[J]. *The Scientific World Journal*, 2013: 230795.
- [45] 黄福辉, 项发根, 周为民. 关于山苍子有效成份在储粮中的应用[J]. *粮食贮藏*, 1980, 8(2): 19–22. [HUANG Fuhui, XIANG Fagen, ZHOU Weimin. Application of effective components of *Litsea cubeba* in grain storage[J]. *Grain Storage*, 1980, 8(2): 19–22.]
- [46] 季茂聘. 浅谈粮食中黄曲霉毒素 B₁ 的去毒方法[J]. *粮油仓储科技通讯*, 2005, 20(2): 50. [JI Maopin. Discussion on detoxification of Aflatoxin B₁ in grain[J]. *Liangyou Cangchu Keji Tongxun*, 2005, 20(2): 50.]
- [47] AROYEUN S O, ADEGOKE G O. 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.
- [48] 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. [YUAN Yuan. Study on the control of mycotoxins by essential oils[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013.]
- [49] EL ASBAHANI A, MILADI K, BADRI W, et al. Essential oils: from extraction to encapsulation[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2015, 483(1-2): 220–243.
- [50] PRAKASH B, KUJUR A, YADAV A, et al. Nanoencapsulation: an efficient technology to boost the antimicrobial potential of plant essential oils in food system[J]. *Food Control*, 2018, 89: 1–11.
- [51] QUINTANILLA-CARVAJAL M X, CAMACHO-DIAZ H, MERAZ-TORRES L S, et al. Nanoencapsulation: a new trend in food engineering processing[J]. *Food Engineering Reviews*, 2010, 2(1): 39–50.
- [52] DWIVEDY A K, SINGH V K, PRAKASH B, et al. Nanoencapsulated *Illicium verum* Hook. f. essential oil as an effective novel plant-based preservative against aflatoxin B₁ production and free radical generation[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2018, 111: 102–113.
- [53] KALAGATUR N K, NIRMAL GHOSH O S, SUNDARARAJ N, et al. Antifungal activity of chitosan nanoparticles encapsulated with *cymbopogon martinii* essential oil on plant pathogenic fungi *Fusarium graminearum*[J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2018, 9: 610.
- [54] WAN J, ZHONG S, SCHWARZ P, et al. 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.
- [55] 冯文旭, 吴殿辉, 蔡国林, 等. 精油纳米乳液对禾谷镰刀菌的抑制作用[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(9): 94–100. [FENG Wenxu, WU Dianhui, CAI Guolin, et al. The inhibitory effect of essential oil nanoemulsions on *Fusarium graminearum*[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(9): 94–100.]
- [56] ANOOJ E S, CHARUMATH Y M, SHARMA V, et al. Nanogels: an overview of properties, biomedical applications, future research trends and developments[J]. *Journal of Molecular Structure*, 2021, 1239(19): 130446.
- [57] YADAV A, KUJUR A, KUMAR A, et al. Encapsulation of Bunium persicum essential oil using chitosan nanopolymer: Preparation, characterization, antifungal assessment, and thermal stability[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 142: 172–180.
- [58] DAS S, SINGH V K, DWIVEDY A K, et al. Fabrication, characterization and practical efficacy of *Myristica fragrans* essential oil nanoemulsion delivery system against postharvest biodeterioration[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 189: 110000.
- [59] CHAUDHARI A K, SINGH V K, DEEPIKA S D, et al. Improvement of *in vitro* and *in situ* antifungal, AFB₁ inhibitory and antioxidant activity of *Origanum majorana* L. essential oil through nanoemulsion and recommending as novel food preservative[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2020, 143: 111536.
- [60] SINGH V K, DAS S, DWIVEDY A K, et al. Assessment of chemically characterized nanoencapsulated *Ocimum sanctum* essential oil against aflatoxigenic fungi contaminating herbal raw materials and its novel mode of action as methylglyoxal inhibitor[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2019, 153: 87–95.
- [61] DAS S, SINGH V K, DWIVEDY A K, et al. Nanostructured *Pimpinella anisum* essential oil as novel green food preservative against fungal infestation, aflatoxin B₁ contamination and deterioration of nutritional qualities[J]. *Food Chemistry*, 2020, 344: 128574.
- [62] DAS S, SINGH V K, DWIVEDY A K, et al. Encapsulation in chitosan-based nanomatrix as an efficient green technology to boost the antimicrobial, antioxidant and *in situ* efficacy of *Coriandrum sativum* essential oil[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 133: 294–305.
- [63] LÓPEZ-MENESES A K, PLASCENCIA-JATOMEA M, LIZARDI-MENDOZA J, et al. *Schinus molle* L. Essential oil-loaded chitosan nanoparticles: Preparation, characterization, antifungal and anti-aflatoxigenic properties[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 96: 597–603.
- [64] DAS S, SINGH V K, DWIVEDY A K, et al. Eugenol loaded chitosan nanoemulsion for food protection and inhibition of aflatoxin B₁ synthesizing genes based on molecular docking[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 255: 117339.
- [65] CHAUDHARI A K, SINGH A, SINGH V K, et al. Assessment of chitosan biopolymer encapsulated α -Terpineol against fungal, aflatoxin B₁ (AFB₁) and free radicals mediated deterioration of stored maize and possible mode of action[J]. *Food Chemistry*, 2020, 311: 126010.
- [66] CHAUDHARI A K, SINGH V K, DAS S, et al. Antimicrobial, aflatoxin B₁ inhibitory and lipid oxidation suppressing potential of anethole-based chitosan nanoemulsion as novel preservative for protection of stored maize[J]. *Food and Bioprocess Technology*

- gy, 2020, 13: 1462–1477.
- [67] WAN J, JIN Z, ZHONG S, et al. Clove oil-in-water nanoemulsion: mitigates growth of *Fusarium graminearum* and trichothecene mycotoxin production during the malting of *Fusarium* infected barley[J]. *Food Chemistry*, 2020, 312: 126120.
- [68] SINGH P, DASGUPTA N, SINGH V, et al. Inhibitory effect of clove oil nanoemulsion on fumonisin isolated from maize kernels[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 134: 110237.
- [69] WU D, LU J, ZHONG S, et al. Effect of chitosan coatings on physical stability, antifungal and mycotoxin inhibitory activities of lecithin stabilized cinnamon oil-in-water emulsions[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 106: 98–104.
- [70] YADAV A, KUJUR A, KUMAR A, et al. Assessing the preservative efficacy of nanoencapsulated mace essential oil against food borne molds, aflatoxin B₁ contamination, and free radical generation [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 108: 429–436.
- [71] KUJUR A, KUMAR A, YADAV A, et al. Antifungal and aflatoxin B₁ inhibitory efficacy of nanoencapsulated *Pelargonium graveolens* L. essential oil and its mode of action[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 130: 109619.
- [72] KUMAR A, SINGH P P, GUPTA V, et al. Assessing the antifungal and aflatoxin B₁ inhibitory efficacy of nanoencapsulated antifungal formulation based on combination of *Ocimum* spp. essential oils[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2020, 330: 108766.
- [73] KUMAR A, KUJUR A, SINGH P P, et al. Nanoencapsulated plant-based bioactive formulation against food-borne molds and aflatoxin B₁ contamination: Preparation, characterization and stability evaluation in the food system[J]. *Food Chemistry*, 2019, 287: 139–150.