

王佳宇, 胡文忠, 管玉格, 等. 柠檬烯抑菌机理及其在果蔬保鲜中应用的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(14): 414–419. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020080115

WANG Jiayu, HU Wenzhong, GUAN Yuge, et al. Research Progress on the Bacteriostatic Mechanism of Limonene and Its Application in Fruit and Vegetable Preservation [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(14): 414–419. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020080115

· 专题综述 ·

柠檬烯抑菌机理及其在果蔬保鲜中应用的研究进展

王佳宇¹, 胡文忠^{1,*}, 管玉格², 于皎雪¹, 赵曼如¹

(1. 大连民族大学生命科学学院, 辽宁大连 116600;

2. 大连理工大学生命科学与技术学院, 辽宁大连 116024)

摘要: 果蔬在采后贮藏保鲜过程中极易被微生物侵染而腐烂变质, 这严重影响其货架期与质量安全, 甚至较大经济损失。为此, 研发具有抑菌效果显著、生物安全性高的天然防腐剂一直是果蔬保鲜领域学者关注的热点。柠檬烯因具有广谱抑菌性且安全性佳, 已被广泛应用于果蔬保鲜领域。本文主要论述了柠檬烯的抑菌机理及其在果蔬保鲜领域中的应用, 并讨论了其未来的发展方向, 以期柠檬烯在果蔬及其他食品保鲜中的进一步研究和应用提供参考。

关键词: 柠檬烯; 抑菌机理; 果蔬; 保鲜

中图分类号: TS255.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2021)14-0414-06

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2020080115

Research Progress on the Bacteriostatic Mechanism of Limonene and Its Application in Fruit and Vegetable Preservation

WANG Jiayu¹, HU Wenzhong^{1,*}, GUAN Yuge², YU Jiaoxue¹, ZHAO Manru¹

(1. College of Life Science, Dalian Minzu University, Dalian 116600, China;

2. College of Life Science and Biotechnology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Fruits and vegetables are prone to rot and deterioration caused by microbial infection during storage and preservation, which seriously affects their shelf life, quality and safety, and causes large economic losses. Therefore, the research and development of natural preservatives with obvious bacteriostatic effect and high biological safety has always been the focus of scholars in the field of fruit and vegetable preservation. Limonene has been widely used in the field of fruit and vegetable preservation because of its broad-spectrum antibacterial activity and good safety. In this paper, the antibacterial mechanism of limonene and its application in fruit and vegetable preservation are summarized, and its future development direction is discussed in order to provide reference for further research and application of limonene in fruit and vegetable preservation and other foods.

Key words: limonene; bacteriostatic mechanism; fruits and vegetables; freshness

微生物是引起果蔬腐败变质的主要原因, 而使用防腐剂可以有效抑制致腐微生物生长, 减缓新鲜果蔬腐败变质, 提高其感官品质, 延长货架期^[1-2]。但是由于目前化学防腐剂的安全残留性问题已不能满足

消费者对于食品安全的高要求, 近年来经济、环保、高效的天然生物防腐剂逐渐成为果蔬保鲜领域的研究热点^[3-4]。

柠檬烯(Limonene)又名萜烯, 是一种单环单萜

收稿日期: 2020-08-13

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFD0400903); 国家自然科学基金项目(31471923, 31172009)。

作者简介: 王佳宇(1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学与工程, E-mail: 2549086789@qq.com。

* 通信作者: 胡文忠(1959-), 男, 教授, 博士, 研究方向: 食品科学, E-mail: h wz@dl nu.edu.cn。

烯,可主要从橘皮精油、柑桔油、白(青)柠檬油、甜橙油、佛手油、柚子油以及榄香树脂等精油中提取^[5-6]。柠檬烯具有良好的抑菌作用,可有效抑制大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、枯草芽孢杆菌、铜绿假单胞菌、荧光假单胞菌、黑曲霉菌以及鲁氏酵母等生长,且其安全性较高,于 20 世纪 90 年代已被世界卫生组织(WHO)报道为无致癌性、无遗传毒性。美国食用香料与提取物制造商协会认定其为一般公认安全级(Generally Recognized as Safe, GRAS),国际日用香精香料协会(International Fragrance Association, IFRA)不限定柠檬烯的用量,并已经过了美国食品药品监督管理局(Food and Drug Administration, FDA)的批准使用^[7]。且有研究表明,柠檬烯被摄入机体后,大部分都可随汗液、尿液等排出,不会在体内积累对人体产生毒副作用,因此其近年来已被广泛应用于果蔬保鲜领域^[8]。本文主要是对柠檬烯的抑菌作用及其在果蔬保鲜领域中的应用进行介绍,并讨论了其在今后的发展方向,以期对柠檬烯在果蔬以及其他食品保鲜应用中的进一步研究提供参考。

1 柠檬烯的结构、理化性质及功效作用

1.1 结构

柠檬烯化学名为 1-甲基-4-异丙基环己烯,分子式为 $C_{10}H_{16}$,分子量为 163.24,主要以 3 种构型的异构体形式存在,分别为 *L*-柠檬烯、*DL*-柠檬烯和 *D*-柠檬烯。在果蔬中柠檬烯主要以 *D*-柠檬烯(即右旋柠檬烯)构型的异构体形式存在,其含量可占 95% 以上,而 *L*-柠檬烯(左旋柠檬烯)和 *DL*-柠檬烯(二聚异戊二烯)构型的异构体含量较低^[9]。*D*-柠檬烯的分子结构式如图 1 所示^[10]。

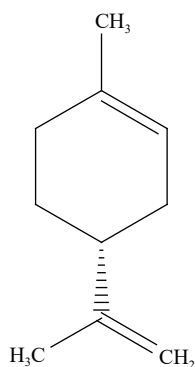


图 1 *D*-柠檬烯分子结构

Fig.1 Molecular structural formula of *D*-limonene

1.2 理化性质和功效作用

柠檬烯是一种具有类似于柠檬香气,呈无色或者淡黄色的油状液体,其不溶于水,易溶于乙酸乙酯、正己烷、乙醇以及丙酮等有机溶剂^[11]。柠檬烯在光照、空气与水分条件存在下极易氧化为柠檬烯过氧化物,而柠檬烯过氧化物不稳定,会进一步转化为香芹酮、香芹醇等杂质,因此提取柠檬烯的过程要极其小心。而目前提取柠檬烯的方法主要有蒸馏法(又

分为水蒸气蒸馏法、减压蒸馏法和分子蒸馏法)、有机溶剂浸提法、超临界 CO_2 萃取法以及超声波辅助提取法等,其中,超临界 CO_2 萃取法是目前比较理想的柠檬烯提取方法,可使柠檬烯的萃取得率达 80% 以上^[12-13]。柠檬烯具有良好的生理活性与功效作用,如抗肿瘤^[14-22]、抗氧化^[23-24]、降低肝脏损伤^[25]、缓解失眠与焦虑^[26]、祛痰平喘以及利胆溶石^[27] 等。

2 柠檬烯的抑菌作用及抑菌机理

2.1 抑菌作用

食品在加工和贮藏过程中极易受大肠杆菌(*Escherichia coli*)、金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)、枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)以及苏云金芽孢杆菌(*Bacillus thuringiensis*)等细菌的污染,严重影响食品感官品质以及增加潜在的安全性问题^[28]。而近年来国内外学者对于柠檬烯抗菌性的研究证明,柠檬烯可以有效地抑制细菌生长,如章斌等^[29]为探讨尤力克柠檬果皮精油中柠檬烯的抑菌作用,结果发现其可以有效抑制大肠杆菌(*Escherichia coli*)、金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)和枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)的生长,抑菌圈直径分别达 (9.19 ± 0.64) 、 (9.44 ± 0.27) 、 (9.78 ± 0.26) mm;冯堃等^[30]使用牛津杯法同样证明柠檬烯可有效抑制大肠杆菌(*Escherichia coli*)、金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)、四联球菌(*Micrococcus tetragenus*)以及枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)的生长和繁殖,这与章斌等的实验结果基本一致。除此之外,柠檬烯同样还可对一些其他细菌起到抑制作用,详见表 1 所示^[28]。

柠檬烯的广谱抑菌性还体现在其对真菌也有一定的抑制作用,可有效抑制黑曲霉菌(*Aspergillus niger*)、黄曲霉菌(*Aspergillus flavus*)、鲁氏酵母(*Saccharomyces rouxii* Boutroux)、串珠镰刀菌(*Fusarium moniliforme* Sheld)以及啤酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)等的生长,详见表 2 所示^[28]。

2.2 抑菌机理

精油以其广谱的抑菌性、优良的抑菌活性以及安全无毒的优势,近年来在抑菌方面得到了广泛的关注,其中,普遍推测是由于微生物细胞膜与植物精油的疏水性成分相结合,从而导致微生物的结构被破坏,甚至死亡。Burt^[42]系统地论述了精油的抑菌机理,并且陈述了植物精油对微生物细胞结构中的多个作用靶点,这些作用方式主要包括破坏细胞膜、降解细胞壁、破坏膜蛋白、凝结细胞质、损耗质子主动运输力以及使细胞内溶物渗出等,如图 2 所示^[42-43]。

近年来,国内外学者对于柠檬烯的抑菌机理进行了较长时间的深入研究,但同大部分的植物精油一样,目前对其抑菌机理还未有明确的结论,许多学者也在进一步探讨之中。微生物细胞壁是维持其外形、协助细胞运动、抑制渗透和机械损伤以及防止大分子入侵等生理功能的重要结构^[44-45],有研究表明微生物细胞壁是柠檬烯作用的首要靶点,其可以通过调

表 1 柠檬烯对细菌的抑制作用
Table 1 Inhibit effect of limonene on bacteria

抑菌剂	抑菌种类	实验方法	抑菌强度(抑菌圈、最小抑菌浓度、抑菌活性及抑菌率)	参考文献
柠檬烯	大肠杆菌(<i>Escherichia coli</i>)	牛津杯法	抑菌圈: (9.19±0.64)mm	[29]
	金黄色葡萄球菌(<i>Staphylococcus aureus</i>)		抑菌圈: (9.44±0.27)mm	
	枯草芽孢杆菌(<i>Bacillus subtilis</i>)		抑菌圈: (9.78±0.26)mm	
	大肠杆菌(<i>Escherichia coli</i>)	牛津杯法	抑菌活性: 0.955°	[30]
	金黄色葡萄球菌(<i>Staphylococcus aureus</i>)		抑菌活性: 0.942°	
	四联球菌(<i>Micrococcus tetragenus</i>)		抑菌活性: 0.935°	
	枯草芽孢杆菌(<i>Bacillus subtilis</i>)		抑菌活性: 0.877	
	金黄色葡萄球菌(<i>Staphylococcus aureus</i>)	琼脂扩散法	抑菌率=100%	[31]
	大肠杆菌(<i>Escherichia coli</i>)		抑菌率=95%	
	山夫登堡沙门氏菌(<i>S.senftenberg</i>)		抑菌率=97%	
	假单胞菌属(<i>Pseudomonas sp.</i>)		抑菌率=86%	
	大肠杆菌(<i>Escherichia coli</i>)	琼脂稀释法	MIC(v/v): 0.05~0.1%	[32]
	金黄色葡萄球菌(<i>Staphylococcus aureus</i>)		MIC(v/v): 0.05~0.1%	
	枯草芽孢杆菌(<i>Bacillus subtilis</i>)		MIC(v/v): 0.05~0.1%	
	大肠杆菌(<i>Escherichia coli</i>)	肉汤稀释法	MIC: 1 µg/mL	[33]
	金黄色葡萄球菌(<i>Staphylococcus aureus</i>)		MIC: 1 µg/mL	
	枯草芽孢杆菌(<i>Bacillus subtilis</i>)		MIC: 1 µg/mL	
	沙门氏菌(<i>Salmonella spp.</i>)	改善的琼脂稀释法	MIC (v/v)=1%	[34]
	苏云金芽孢杆菌(<i>Bacillus thuringiensis</i>)	琼脂打孔扩散法和最低抑菌溶度法	MIC: 1000 mg/L	[35]
	大肠杆菌(<i>Escherichia coli</i>)		MIC: 3000 mg/L	
	金黄色葡萄球菌(<i>Staphylococcus aureus</i>)		MIC>2000 mg/L	
	枯草芽孢杆菌(<i>Bacillus subtilis</i>)		MIC: 2000 mg/L	
	荧光假单胞菌(<i>Pseudomonas fluorescens</i>)	最低抑菌溶度法	MIC=20 mL/L	[36]
	铜绿假单胞菌(<i>P.Aeruginosa</i>)	最低抑菌溶度法	MIC=10 mL/L	[37]

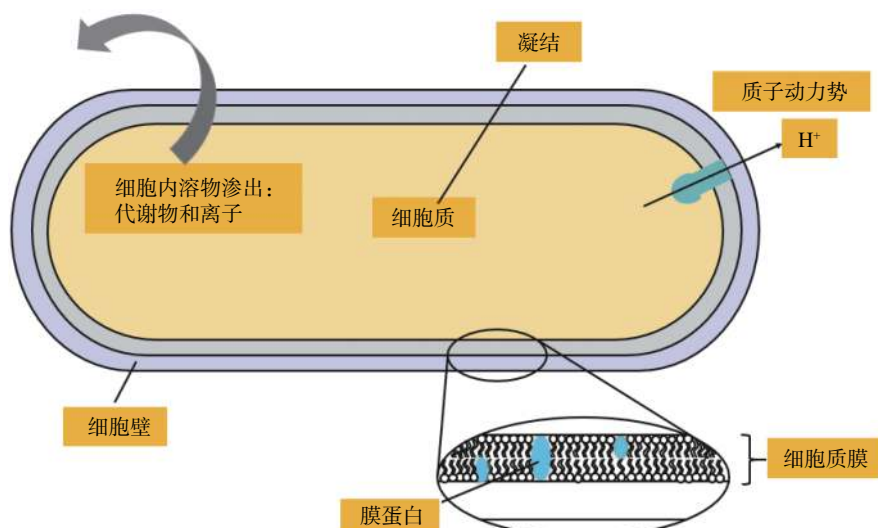
表 2 柠檬烯对真菌的抑制作用
Table 2 Inhibit effect of limonene on fungus

抑菌剂	抑菌种类	实验方法	抑菌强度(抑菌圈、最小抑菌浓度、抑菌活性及抑菌率)	参考文献
柠檬烯	毛霉(<i>Mucors</i>)	琼脂稀释法	MIC(v/v): 0.1%~0.2%	[32]
	酵母菌(<i>Yeast</i>)		MIC(v/v): 0.2%~0.4%	
	青霉菌(<i>Penicillium</i>)		MIC(v/v): 0.2%~0.4%	
	酿酒酵母(<i>Saccharomyces cerevisiae</i>)	肉汤稀释法	MIC: 0.5 µg/mL	[33]
	黑曲霉(<i>Aspergillus niger</i>)	最低抑菌溶度法	MIC: 4000 mg/L	[35]
	啤酒酵母(<i>Saccharomyces cerevisiae</i>)		MIC: 320 mg/L	
	青霉(<i>Penicillium sp.</i>)		MIC>5000 mg/L	
	面包酵母(<i>Saccharomyces sp.</i>)		MIC: 320 mg/L	
	黑曲霉菌(<i>Aspergillus niger</i>)	纸片扩散法	抑菌圈: (9.0±1.41)mm	[38]
	青霉菌菌(<i>Penicillium sp.</i>)		抑菌圈: (3.0±1.41)mm	
	黄曲霉菌(<i>Aspergillus flavus</i>)		抑菌圈: (7.5±3.54)mm	
	黄曲霉(<i>Aspergillus flavus</i>)	纸片扩散法	抑制率: 100%(500 ppm)	[39]
	串珠镰刀菌(<i>F.verticillioides</i>)	半固体琼脂抗菌测定法	抑制率: 100%(75 ppm)	[40]
	鲁氏酵母(<i>Saccharomyces rouxii</i> Boutroux)	最低抑菌溶度法	MIC=0.75 µL/mL	[41]

控果胶甲酯酶(PEP)和纤维素酶(CAS)的活性,破坏细胞壁使其死亡;也有些学者认为柠檬烯可以通过干扰微生物菌体内正常的能量代谢途径,如破坏膜电位平衡、降低质子动力以及使三磷酸腺苷(ATP)合成受阻等,从而打破微生物代谢平衡使其死亡,而且柠檬烯在浓度为 5×10^{-3} mol/L 时即可起到抑制作用^[46];也有研究表明柠檬烯可通过作用于微生物的细胞膜,破坏其完整性,使细胞出现破裂、孔洞以及塌陷等现象,引起细胞内容物外泄露出,从而导致细胞正常的生长繁殖受阻。此外研究学者还发现,柠檬烯除了以渗透作用进入细胞膜外,其还可以透过线粒体膜,从而使微生物菌体的细胞器和相同离子渗出过程中的渗透率增大^[47];除此之外,胡菲菲^[48]探究酿酒酵母耐受 *D*-柠檬烯胁迫的蛋白质组学分析得出, *D*-柠檬烯

可使酿酒酵母细胞中具有调控细胞增殖分裂功能的 Cpr1p 和 DNA 修复能力的 Rpt4p 下调,从而抑制酿酒酵母细胞增殖,这也为柠檬烯的抑菌机制提供了重要线索。

而在目前的研究中,柠檬烯通过作用于微生物细胞膜从而达到抑制其生长繁殖目的的抑菌机理得到了普遍认同。整个过程中,柠檬烯的疏水性可使其能够扩散通过磷脂双层膜,从而导致细胞膜中不饱和脂肪酸比例变化,细胞膜结构被改变,最终使微生物死亡,该抑菌机理也得到了许多学者的验证。如 Pasqua 等^[49]使用扫描电镜探究柠檬烯对金黄色葡萄球菌、肠道沙门氏菌和嗜热甲烷八联球菌细胞膜的影响,研究发现,柠檬烯作用于受试菌后,能够引起细胞膜结构变化,且细胞膜中不饱和脂肪酸含量明显减

图 2 精油对菌体细胞抑制作用的靶点^[38-39]Fig.2 Locations in the microbial cell thought to be sites of action foressential oil^[38-39]

少; Pasqua 等^[50] 也提出大肠杆菌 O157:H7、葡萄球菌经柠檬烯作用后,经扫描电镜观察,发现上述微生物的细胞膜发生了明显的变化,且经测定同样发现细胞膜中不饱和脂肪酸含量明显下降;这在探究柠檬烯处理大肠杆菌、荧光假单胞菌以及铜绿假单胞菌等抑菌机理时也得到了相似结果^[36-37]。

3 柠檬烯在果蔬保鲜中的应用

新鲜果蔬含有丰富的蛋白质、维生素以及多种人体必需的矿物质等营养成分,且热量低,因此广受消费者的青睐^[51-52]。然而大多数新鲜果蔬由于在采摘、运输、贮藏以及销售过程中受到的机械损伤,极易遭受微生物侵染,而微生物是导致果蔬发生腐败变质最主要因素之一。虽然果蔬内含有次生代谢产物可暂时抵御微生物的生长,但微生物可通过产生毒性化合物或者以发酵的方式逐渐改变果蔬内的环境以达到其生存的目的,从而造成果蔬营养成分流失、感官品质下降,并引发一系列潜在的食品安全问题^[53-54]。研究发现将柠檬烯单独处理或与其他制剂复配处理新鲜果蔬后,均可有效达到抑制微生物生长、保留新鲜果蔬营养成分以及提高感官品质的作用。

3.1 单独柠檬烯处理

由于柠檬烯自身溶解度较低,因此在果蔬保鲜应用中为提高柠檬烯溶解度需要提前将其乳化,而目前大多数研究的乳化方法为柠檬烯:蛋黄卵磷脂=25:2 混合处理。研究发现青椒经柠檬烯乳化液处理后,对其腐烂有明显的抑制作用,可将腐烂率降低 30%,并且其也可以降低青椒相对电导率,减缓细胞膜透性,从而保护青椒细胞膜系统,将细胞膜损伤程度降低 2.103 倍^[55];赵菊莲等^[56] 同样探究柠檬烯乳化液对杏果实的保鲜效果,研究发现该处理可使杏果实表面形成一层保护膜,延缓其在贮藏期间呼吸作用、能量代谢等生理活动,同时还可有效抑制致腐微生物入侵,降低杏果实腐败变质的发生;除此之外,学

者们研究发现使用柠檬烯乳化液处理油桃^[57]、草莓^[58]和菠菜^[59]后,其也可以有效减缓上述果蔬维生素 C、可溶性固形物以及可滴定酸的分解与消耗,提高油桃、草莓和菠菜在贮藏期间的营养价值与商品价值,延长货架期。

3.2 复合柠檬烯处理

近年来,一些学者还重点研究了柠檬烯与其它制剂联合使用的果蔬保鲜技术。研究发现使用壳聚糖-柠檬烯涂膜与气调贮藏(初始浓度: 10% O₂+CO₂)相结合的方法对黄瓜进行保鲜,可保持黄瓜在贮藏期间的失重率、硬度、pH、色泽、玻璃化转变温度等指标,并且还可以通过抑制酵母菌和霉菌的生长繁殖来延缓黄瓜腐败变质的发生,延长其货架期^[60];此外,学者们还研究发现用含有柠檬烯的可食性涂膜处理草莓同样可以有效抑制酵母菌和霉菌的生长,并且还可以通过调控合成花青素途径中的关键酶苯丙氨酸解氨酶(PAL)的活性,使草莓维持较高的花青素含量(43.849 mg/100 g),从而保持草莓鲜红的色泽^[61-62];在芒果保鲜上,使用聚乙烯醇、壳聚糖和柠檬烯制成的包装膜可有效抑制金黄色葡萄球菌和大肠杆菌生长,使抑菌圈直径分别为(6.61±0.04)和(6.88±0.02)mm,将芒果在贮藏期间的腐烂率降低至 20% 以下^[63],有效延缓了腐烂变质的发生。

综上,柠檬烯作为一种从橘皮精油中提取的天然、高效、安全的生物防腐剂已在一些果蔬保鲜应用中取得了良好的效果,其在鲜切果蔬保鲜及其他食品保鲜行业也具有重要的应用发展前景。

4 展望

柠檬烯作为一种优良的天然植物精油,因具有广谱的抑菌性,且安全性可靠已被广泛应用于食品保鲜、医药、农药等领域,在市场上的应用前景非常广阔。但是目前国内外对其抑菌机理的研究尚不明晰,对果蔬保鲜种类研究也较少,因此,今后可以着重探

究柠檬烯的抑菌机理,以及增加柠檬烯对其他果蔬保鲜效果的研究,为其商业应用奠定理论基础。

参考文献

- [1] 毕文慧,姚健,刘学俊,等.微生物在果蔬贮藏保鲜中的应用研究进展[J].食品工业科技,2017,38(20):347-351.
- [2] Liu W C, Zhang M, Bhandari B. Nanotechnology-a shelf life extension strategy for fruits and vegetables[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60(10): 1-16.
- [3] 吕奎营,赵秋香,赵媛媛,等.天然食品防腐剂及其在食品中的应用研究[J].中国调味品,2020,45(4):186-188,200.
- [4] 陈帅,高彦祥.肉桂醛的抑菌机理及其在食品行业中的应用研究进展[J].中国食品添加剂,2019,30(5):134-144.
- [5] Dias A L B, Sousa W C, Batista H R F, et al. Chemical composition and *in vitro* inhibitory effects of essential oils from fruit peel of three citrus species and limonene on mycelial growth of *Sclerotinia sclerotiorum*[J]. Brazilian Journal of Biology, 2020, 80(2): 460-464.
- [6] 蒋莹,刘欣.柠檬烯的开发利用研究进展[J].食品安全导刊,2018(9):133.
- [7] 黄巧娟,黄林华,孙志高,等.柠檬烯的安全性研究进展[J].食品科学,2015,36(15):277-281.
- [8] 吴小禾,邹爱国,唐林新,等.天然提取物D-柠檬烯作为食品添加剂成分的研究进展[J].轻工科技,2017,33(3):1-2,28.
- [9] 刘雅倩,刘珍秀,高波,等.柠檬烯在农药领域的应用进展[J].中国植保导刊,2019,39(8):24-28,69.
- [10] 王文渊,韩立路,张芸兰,等.橘皮柠檬烯的研究与应用进展[J].精细与专用化学品,2012,20(5):46-50.
- [11] 郝静梅.柠檬烯脂质体的制备及其性质研究[D].重庆:西南大学,2018.
- [12] 唐晓蓉.柠檬烯提取方法的研究进展[J].四川医学,2011,32(8):1300-1302.
- [13] 徐宁,谭兴和,张喻,等.柑橘精油中柠檬烯提取方法研究进展[J].粮油食品科技,2013,21(4):41-44.
- [14] Elegbede J A, Elson C E, Qureshi A, et al. Inhibition of DMBA-induced mammary cancer by the monoterpene D-limonene[J]. Carcinogenesis, 1984, 5(5): 661-664.
- [15] Murthy K N C, Jayaprakasha G K, Patil B S. D-limonene rich volatile oil from blood oranges inhibits angiogenesis, metastasis and cell death in human colon cancer cells[J]. Life Sciences, 2012, 91(11-12): 429-439.
- [16] Parija T, Das B R. Involvement of YY1 and its correlation with c-myc in NDEA induced hepatocarcinogenesis, its prevention by D-limonene[J]. Molecular biology reports, 2003, 30(1): 41-46.
- [17] Kaji I, Tatsuta M, Iishi H, et al. Inhibition by D-limonene of experimental hepatocarcinogenesis in sprague-dawley rats does not involve p21^{ras} plasma membrane association[J]. International Journal of Cancer, 2001, 93(3): 441-444.
- [18] 杨明翰,骆骄阳,乔美玲,等.多伞阿魏挥发油化学成分GC-MS分析及D-柠檬烯抗胃癌活性研究[J].中国现代应用药学,2020,37(7):806-813.
- [19] Lu X G, Zhan L B, Feng B A, et al. Inhibition of growth and metastasis of human gastric cancer implanted in nude mice by D-limonene[J]. World Journal of Gastroenterology: WJG, 2004, 10(14): 2140.
- [20] Chaudhary S C, Siddiqui M S, Athar M, et al. D-Limonene modulates inflammation, oxidative stress and Ras-ERK pathway to inhibit murine skin tumorigenesis[J]. Human & Experimental Toxicology, 2012, 31(8): 798-811.
- [21] 王金香,张玉祥.D-柠檬烯诱导白血病细胞凋亡的机制研究[J].科技资讯,2010(5):6-9.
- [22] 杨真,纪军,刁凤声.右旋柠檬烯诱导人白血病细胞凋亡作用机制的初步研究[J].肿瘤,2008(11):938-941.
- [23] 章斌,侯小桢,秦轶,等.柠檬果皮精油的化学组成、抗氧化及抑菌活性研究[J].食品工业科技,2015,36(5):126-131.
- [24] Jayaprakasha G K, Murthy K N C, Demarais R, et al. Inhibition of prostate cancer (LNCaP) cell proliferation by volatile components from *Nagami kumquats*[J]. Planta Medica, 2012, 78(10): 974-980.
- [25] 王东风,梁惠,王文成.D-柠檬烯对大鼠酒精性肝损伤脂质代谢紊乱的影响[J].食品科学,2015,36(5):163-167.
- [26] 彭钟秀,姚雷,杜红梅,等.2种精油成分对缓解大学生失眠与焦虑的影响[J].上海交通大学学报(农业科学版),2019,37(2):54-58.
- [27] 曹甜,刘晓艳,丁心,等.柠檬烯的研究与应用进展[J].农产品加工,2017(16):51-54.
- [28] 郝静梅,盛冉,孙志高,等.柠檬烯抗菌性研究进展[J].食品与发酵工业,2017,43(2):274-278.
- [29] 章斌,侯小桢,秦轶,等.柠檬果皮精油主要组分抑菌及抗氧化活性研究[J].食品与机械,2017,33(12):138-142.
- [30] 冯强,秦昭,王文蜀,等.5种柚皮精油成分及油脂抗氧化和抑菌活性[J].食品科技,2018,43(11):255-261.
- [31] Dabbah R, Edwards V M, Moats W A, et al. Antimicrobial action of some citrus fruit oils on selected food-borne bacteria[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1970, 19(1): 27-31.
- [32] 李巧巧,雷激,唐洁,等.柑橘精油的抑菌性及D-柠檬烯在面包的初步应用研究[J].食品工业,2012,33(1):21-23.
- [33] Zahi M R, Liang H, Yuan Q. Improving the antimicrobial activity of D-limonene using a novel organogel-based nanomulsion[J]. Food Control, 2015, 50: 554-559.
- [34] Obryan C A, Crandall P G, Chalova V I, et al. Orange essential oils antimicrobial activities against *Salmonella* spp. [J]. Journal of Food Science, 2008, 73(6): M264-7.
- [35] 王雪梅,湛徽,李雪姣,等.天然活性单萜—柠檬烯的抑菌性能研究[J].吉林农业大学学报,2010,32(1):24-28.
- [36] 舒慧珍,唐志凌,刘雪,等.柠檬烯对荧光假单胞菌抑菌活性及机理研究[J].食品工业科技,2019,40(12):134-140.
- [37] 刘雪,王静楠,陈文学,等.柠檬烯对铜绿假单胞菌的抑菌活性及其机理[J].食品工业科技,2018,39(7):1-5.
- [38] Omran S M, Moodi M A, Bagher S M, et al. The effects of limonene and orange peel extracts on some spoilage fungi[J]. International Journal of Molecular & Clinical Microbiology, 2011(1): 82-86.
- [39] Singh P, Shukla R, Prakash B, et al. Chemical profile, antifungal, antiaflatoxic and antioxidant activity of *Citrus maxima* Burm. and *Citrus sinensis* (L.) Osbeck essential oils and their cyclic monoterpene, DL-limonene[J]. Food and Chemical

Toxicology, 2010, 48(6): 1734–1740.

[40] 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 Official Journal of the International Society on Toxinology*, 2008, 51(1): 37–44.

[41] Cai R, Hu M, Zhang Y, et al. Antifungal activity and mechanism of citral, limonene and eugenol against *Zygosaccharomyces rouxii*[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 106: 50–56.

[42] Burt S A. Essential oils: Their antibacterial properties and potential applications in foods-A review.[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2004, 94(3): 223–253.

[43] 吕飞. 天然植物精油的抑菌活性及其作用机理研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2011.

[44] Marei G I, Rasoul M A, Abdelgaleil S A, et al. Comparative antifungal activities and biochemical effects of monoterpenes on plant pathogenic fungi[J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2012, 103(1): 56–61.

[45] 萨仁高娃, 胡文忠, 冯可, 等. 植物精油及其成分对病原微生物抗菌机理的研究进展[J]. *食品科学*, 2020, 41(11): 285–294.

[46] Knobloch K, Pauli A, Iberl B, et al. Antibacterial and antifungal properties of essential oil components[J]. *Journal of Essential Oil Research*, 1989, 1(3): 119–128.

[47] 关天旺, 刘嘉煜. 柠檬烯的防腐作用及抑菌机理研究进展[J]. *保鲜与加工*, 2015, 15(6): 83–87.

[48] 胡菲菲. 酿酒酵母耐受 *D*-柠檬烯胁迫的蛋白组学分析[D]. 无锡: 江南大学, 2012.

[49] Pasqua R D, Betts G, Hoskins N, et al. Membrane toxicity of antimicrobial compounds from essential oils[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, 55(12): 4863–4870.

[50] Pasqua R D, Hoskins N, Betts G, et al. Changes in membrane fatty acids composition of microbial cells induced by addition of thymol, carvacrol, limonene, cinnamaldehyde, and eugenol in the growing media[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2006, 54(7): 2745–2749.

[51] Choyam S, Srivastava A K, Shin J H, et al. Ocins for food safety[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, 10: 1736.

[52] Haroon E T, Zou X B, Gustav K M, et al. Recent develop-

ments in gum edible coating applications for fruits and vegetables preservation: A review[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2019, 224: 115141.

[53] Xing Y G, Li W X, Wang Q, et al. Antimicrobial nanoparticles incorporated in edible coatings and films for the preservation of fruits and vegetables[J]. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 2019, 24(9): 1695.

[54] Barbosa A A T, Mantovani H C, Jain S. Bacteriocins from lactic acid bacteria and their potential in the preservation of fruit products[J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2017, 37(7): 852–864.

[55] 卢海燕, 梁颖, 刘贤金. 柠檬烯乳化液对青椒采后生理和贮藏品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(18): 332–336.

[56] 赵菊莲, 杨生虎. 柠檬烯乳化液对杏采后保鲜效果的影响[J]. *中国食物与营养*, 2014, 20(4): 42–45.

[57] 赵菊莲, 曹正帅, 张红霞. 柠檬烯复合液对油桃采后保鲜效果的影响[J]. *中国食物与营养*, 2015, 21(1): 35–37.

[58] 赵菊莲, 水建军. 柠檬烯复合液对草莓采后保鲜效果的影响[J]. *中国食物与营养*, 2014, 20(3): 51–54.

[59] 卢海燕, 梁颖, 刘贤金. 柠檬烯乳化液对菠菜采后生理和贮藏品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2013, 34(1): 338–341.

[60] Maleki G, Sedaghat N, Woltering E J, et al. Chitosan-limonene coating in combination with modified atmosphere packaging preserve postharvest quality of cucumber during storage[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2018, 12(3): 1610–1621.

[61] Lan W J, Wang S Y, Chen M R, et al. Developing poly(vinyl alcohol)/chitosan films incorporate with *D*-limonene: Study of structural, antibacterial, and fruit preservation properties[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 145: 722–732.

[62] Dhital R, Joshi P, Becerramora N, et al. Integrity of edible nano-coatings and its effects on quality of strawberries subjected to simulated in-transit vibrations[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017: 257–264.

[63] Dhital R, Mora N B, Watson D G, et al. Efficacy of limonene nano coatings on post-harvest shelf life of strawberries[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 97: 124–134.