几种天然植物精油的抑菌活性及协同增效研究

曹文轩[1]，郑 琦[2]，岳 玲[2]，颜伟强[2]，田文慧[2]，
陈志军[2]，倪迪安[1]，孔秋莲[*2]
(1. 上海应用技术大学 生态技术与工程学院，上海 201418；2. 上海市农业科学院 作物育种栽培研究所，上海 201401)

摘要：采用打孔法、倍数稀释法测定丁香等12种植物精油对常见食品病原菌大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、沙门氏菌的抑菌圈，最低抑菌质量浓度(MIC)和最低杀菌质量浓度(MBC)以评估抑菌效果。选择较强抑菌活性的精油复配，利用倍数稀释法研究协同指数(SI)，选取一种复配精油对冷鲜鸡胸肉进行保鲜，研究菌落总数、大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、沙门氏菌计数和风味变化。结果表明：12种植物精油对3种病原菌的抑菌圈直径为0.3~7.3 cm，MIC为0.98~125 g/L，MBC为3.91~500 g/L。筛选出4种精油两两复配，得到4种对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌或沙门氏菌的协同增效组合，SI最低值分别为0.750、0.375和0.375，其中牛至-松针精油组合明显抑制了鸡胸肉冷藏期间菌落总数、大肠杆菌、金黄色葡萄球菌和沙门氏菌的上升幅度，货架期延长了5 d。该研究筛选的植物精油对食品病原菌有良好的抑制活性，复配增效可有效降低MIC，牛至-松针精油组合对冷鲜鸡胸肉保鲜效果良好，可用于天然食品保鲜剂研发。

关键词：植物精油；最低抑菌浓度；最低杀菌浓度；协同指数
中图分类号：TS 205.9　**文章编号：**1673-1689(2024)05-0101-09　**DOI：**10.12441/spyswjs.20230621001

Antibacterial Activity and Synergistic Enhancement of Several Natural Plant Essential Oils

CAO Wenxuan[1]，*ZHENG Qi*[2]，*YUE Ling*[2]，*YAN Weiqiang*[2]，
TIAN Wenhui[2]，*CHEN Zhijun*[2]，*NI Di'an*[1]，*KONG Qiulian*[*2]
(1. School of Ecotechnology and Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China; 2. Crop Breeding & Cultivation Research Institute, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201401, China)

Abstract: The antibacterial activity of 12 plant essential oils, including *Syringa oblata* Lindl, against prevalent foodborne pathogens such as *Escherichia coli* (*E. coli*), *Staphylococcus aureus* and *Salmonella*, was assessed by the hole punching method and serial dilution method to determine the inhibitory zone, minimum inhibitory concentration (MIC) and minimum bactericidal concentration (MBC). Essential oils with strong antibacterial activity were selected for compounding, and synergistic indices (SI) were investigated using serial dilution method. One of the formulated essential oils was selected to preserve fresh chicken breast. The total number of colony, and the counts of *E. coli*, *Staphylococcus aureus*, and *Salmonella*, as well as the flavor profiles were examined as

收稿日期：2023-06-21　**修回日期：**2023-09-01
基金项目：上海市科技兴农项目(2022-02-08-00-12-F01093)；上海市农业农村领域标准预研制项目(Y-XM-017-2023)。
*** 通信作者：**孔秋莲(1971—)，女，博士，研究员，主要从事农产品保鲜加工研究。E-mail: zwkql@aliyun.com

indicators. The results indicated that the inhibitory zone diameters of 12 plant essential oils against three pathogens ranged from 0.3 to 7.3 cm, with MIC ranging from 0.98 to 125 g/L, and MBC from 3.91 to 500 g/L. Four pairs of essential oils were screened, resulting in four synergistic combinations that showed enhanced antibacterial activity against *E. coli*, *S. aureus* and *Salmonella*, and their lowest SI values were 0.750, 0.375 and 0.375, respectively. Notably, the combination of oregano and pine needle essential oil significantly inhibited the proliferation of the total bacterial colonies, *E. coli* and *Salmonella* of chicken breast during cold storage, extending its shelf life by 5 days. The screened plant essential oils displayed good inhibitory activity against foodborne pathogens, and the combinations exhibited synergistic enhancement in effective MIC reduction. Specifically, the oregano and pine needle essential oil combination demonstrated efficacy in preserving chilled chicken breast, highlighting its potential for natural food preservative development.

Keywords: plants essential oil, minimum inhibitory concentration, minimum bactericidal concentration, synergy index

食源性致病菌污染是全球重大公共安全问题之一,导致的食源性疾病和食物中毒是影响食品安全的最主要原因,严重威胁人们健康[1−2]。据世界卫生组织统计,全世界每年有 6 亿人感染食源性疾病[3]。大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、沙门氏菌是食源性疾病的主要致病菌[4−6]。在我国食品卫生监测中,大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、沙门氏菌等食源性致病菌在熟肉制品、即食豆制品、焙烤食品、中式凉拌菜、牛乳、盒饭等方便即食类食品中多有检出[7]。

化学杀菌消毒是微生物控制的主要方法,但长期、过量使用化学合成抗菌剂易导致环境污染、产生耐药性等问题。天然抗菌剂来源广、低毒无残留、环境相容性好、不易产生抗药性,应用潜力巨大[8−9]。植物是天然抗菌剂的主要来源,提取物中有抗菌活性的次生代谢产物约 400 000 种,其中精油占有很大比例[10−11]。目前关于精油抗菌的研究多为单一组分活性及机制研究,不同精油协同增效的研究较少[12−13]。有研究表明不同精油经复配后,在不增加浓度的情况下可提高其抗菌效果,如将肉桂精油与其他植物精油复配,对细菌的抑菌效果显著高于单一精油[14]。作者选取 12 种植物精油,研究 3 种常见食品病原菌大肠杆菌、金黄色葡萄球菌和沙门氏菌的抑菌效果,筛选出较好抑菌活性的种类并研究其协同增效效果。在此基础上选取一种复配植物精油处理冷鲜鸡胸肉,通过菌落总数、大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、沙门氏菌和风味变化的研究保鲜效果,为进一步研发绿色高效植物源保鲜抑菌剂提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

来自艾草、雏春菊、香茅、牛至、天竺葵、迷迭香、薄荷、松针、芥末、樟脑、罗勒、丁香的 12 种植物精油:上海源叶生物科技有限公司,所有精油均为生物试剂级;冷鲜鸡肉:上海当地超市。

大肠杆菌 (ATCC25922)、金黄色葡萄球菌(ATCC6538):广东环凯生物科技有限公司;沙门氏菌(B631):上海市工业微生物研究所;乙酸乙酯(分析纯):国药集团化学试剂有限公司;胰酪大豆胨液体培养基(TSB)、胰酪大豆胨琼脂培养基(TSA)、平板计数琼脂培养基、结晶紫中性红胆盐琼脂、结晶紫中性红胆盐−4−甲基伞形酮−*β*−*D*−葡萄糖苷琼脂、Baird−Parker 琼脂:北京陆桥技术股份有限公司。

LDZX−75KBS 立式压力蒸汽灭菌器:上海申安医疗器械厂;BSA−3202S−CW 电子天平 (精度 0.01 g):德国赛多利斯科学仪器;SHSN−W1−02−201S 生物安全柜: 美国赛默飞世尔科技公司;ZQZY−70BS 振荡培养箱:上海知楚仪器有限公司;PEN3 型电子鼻:北京盈盛恒泰科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 植物精油溶液配制 以乙酸乙酯为溶剂,配制成不同质量浓度(g/L)精油溶液。

1.2.2 微生物增菌液制备 取−20 ℃保存的菌种恢复到室温,接种于无菌 TSB 中,于(36±1) ℃、150 r/min 振荡培养 24 h。取培养菌液划线 TSA,培养制备单

菌落。挑取单菌落接种到 50 mL 无菌 TSB 中,于(36±1) ℃、150 r/min 振荡培养 18~20 h 得到增菌液,控制微生物水平 10^8 CFU/mL,用于抑菌圈、最低抑菌浓度 MIC、最低杀菌浓度 MBC、协同指数 SI 测定。

1.2.3 植物精油抑菌活性测定 抑菌圈的测定:增菌液和 TSA 培养基按体积比 1:100 混匀并倾注平板,每个平板 10 mL,然后用一次性无菌枪头打孔,孔中加入 500 g/L 精油溶液 100 μL,35 ℃培养 24 h,检测抑菌圈大小。以大肠杆菌、金黄色葡萄球菌和沙门氏菌为指示菌,每组实验设置 5 次重复。

最低抑菌浓度 MIC 和最低杀菌浓度 MBC 测定:采用 TSB 培养基倍数稀释[15],精油质量浓度为 500.00、250.00、125.00、62.50、31.25、15.63、7.81、3.91、1.95 g/L 共 9 个水平。48 孔板中不同质量浓度精油孔中分别加入大肠杆菌、沙门氏菌和金黄色葡萄球菌增菌液并充分混匀。首先吸取 100 μL 增菌液于 TSA 中涂布均匀,37 ℃培养 24 h,观察有无微生物生长,无生长的浓度即为 MBC。吸取 100 μL 混合液后的孔板于37 ℃培养 24 h,观察有无微生物生长,无生长孔对应的浓度即为 MIC。确定有无微生物生长的方法是,选取无明显浑浊的精油质量浓度处理,分别取 100 μL 涂布 TSA 平板,37 ℃培养 24 h,观察是否有菌生长,每个实验重复 3 次。

协同指数 SI 测定:采用棋盘稀释法[16],筛选较强抑菌活性的精油两两复配,分别选取其 MIC 的 2 倍、1 倍及 1/8、1/4、1/2 共 5 个水平,每个实验均重复 3 次,联合 MIC 计算见下式:

$$I_S=\frac{\rho_{MICU(A)}}{\rho_{MICS(A)}}+\frac{\rho_{MICU(B)}}{\rho_{MICS(B)}},$$

式中:I_S 为协同指数(SI 值);ρ_{MICS} 为植物精油单独使用下的 MIC,g/L;ρ_{MICU} 为植物精油复配后抑菌效果最佳的 MIC 的倍数,g/L。

1.2.4 冷鲜鸡胸肉的复配精油保鲜

1)冷鲜鸡胸肉复配精油处理及冷藏保鲜 冷鲜鸡胸肉冷链运至实验室,用食品级自封袋密封包装,立即进行精油熏蒸处理,以没有精油处理的为对照,每个质量(300±10) g,每个处理 6 个重复。精油熏蒸处理为每个重复包装内放置吸附有 2 种精油各 1 mL 的滤纸,并用一次性平板隔离,防止精油直接接触鸡胸肉。据相关研究报道,鸡肉中沙门氏菌污染的严重程度低于金黄色葡萄球菌,导致消费者罹患食物中毒的风险等级也相对较低[17-18]。为此,选择对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌同时协同增效的复配组合进行冷鲜鸡胸肉保鲜,各精油质量浓度依据复配增效后的 MIC。鸡胸肉在 4 ℃冰箱冷藏10 d,定期分别测定菌落总数、大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、沙门氏菌,并利用电子鼻分析鸡胸肉的风味。

2)微生物指标检测 菌落总数、大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、沙门氏菌根据 GB 4789.2—2022《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》、GB 4789.38—2012《食品安全国家标准 食品微生物学检验 大肠埃希氏菌计数》、GB 4789.10—2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 金黄色葡萄球菌检验》、GB 4789.4—2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 沙门氏菌检验》分别测定。

3)风味检测 使用 PEN3 电子鼻,电子鼻气敏传感器探头 W1C、W5S、W3C、W6S、W5C、W1S、W1W、W2S、W2W 和 W3S。鸡胸肉样品切成 0.2 cm×0.2 cm×0.2 cm 的小颗粒,取 1.0 g 放入 10 mL 顶空瓶中,静置 20 min 后检测。检测条件为测定间隔130 s,清洗时间 120 s,归零时间 5 s,准备时间 5 s,测定时间 100 s,载气流量 400 mL/min,进样流量400 mL/min。选定采集信号时间 90 s。测定结果利用 Winmuster 进行响应值分析和主成分分析 (principal component analysis,PCA)。

1.3 数据统计与分析

采用 SPSS 19.0 统计分析软件进行显著性差异分析,$P<0.05$ 表示差异显著。采用 Origin Pro 2018 进行协方差矩阵模式的 PCA 并绘制雷达图。

2 结果与分析

2.1 植物精油抑菌活性筛选

采用直径 9.0 cm 平板,以抑菌圈直径占比 30%、50%、70%、80%为标准,分析抑菌圈直径分别超过 2.7、4.5、6.3、7.2 cm 的精油种类,评价不同精油的抑菌活性。由表 1 可知,大肠杆菌抑菌圈直径超过 30%的有迷迭香、牛至、松针和樟脑 4 种,其中 3 种抑菌圈直径超过 50%,但未超过 70%。金黄色葡萄球菌抑菌圈直径超过 30%的有艾草、芥末、罗勒、迷迭香、牛至、松针、天竺葵和樟脑 8 种,其中 3 种抑菌圈直径超过 50%,2 种抑菌圈直径超过 70%,1 种抑菌圈直径超过 80%。沙门氏菌抑菌圈直径超过 30%的有薄荷、雏春菊、芥末、牛至、松针、樟脑 6

种,其中 4 种抑菌圈直径超过 50%,3 种抑菌圈直径超过 70%,1 种抑菌圈直径超过 80%。12 种精油中,对金黄色葡萄球菌、沙门氏菌有较强抑制活性的种类较多。综合比对 12 种植物精油对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、沙门氏菌的抑菌活性,牛至和松针对 3 种致病菌的抑菌圈直径均大于 50%。

表 1　植物精油对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、沙门氏菌的抑菌圈直径

Table 1　Inhibition zone diameter of plant essential oils against *E. coli*, *Staphylococcus aureus* and *Salmonella*

植物精油	抑菌圈直径/cm		
	大肠杆菌	金黄色葡萄球菌	沙门氏菌
艾草	2.000±0.361^{cd}	3.700±0.617^{bc}	1.400±0.240^{fgh}
薄荷	2.200±0.458^{c}	2.200±0.578^{de}	5.200±0.524^{b}
雏春菊	1.200±0.306^{de}	2.200±0.361^{de}	3.700±0.536^{cd}
丁香	1.200±0.306^{de}	2.200±0.321^{de}	2.400±0.328^{ef}
芥末	0.300±0.111^{f}	2.800±0.437^{cd}	7.300±0.267^{a}
罗勒	0.800±0.252^{e}	3.200±0.481^{cd}	0.600±0.058^{h}
迷迭香	3.700±0.426^{b}	3.700±0.338^{bc}	1.200±0.208^{gh}
牛至	5.200±0.529^{a}	7.300±0.318^{a}	6.400±0.524^{a}
松针	5.200±0.611^{a}	6.400±0.633^{a}	6.400±0.788^{a}
天竺葵	1.400±0.289^{cde}	3.000±0.328^{cd}	2.300±0.481^{ef}
香茅	1.200±0.306^{de}	1.400±0.231^{ef}	1.400±0.240^{fgh}
樟脑	5.200±0.833^{a}	4.500±0.633^{b}	2.800±0.463^{de}

注:同一列中的不同字母表示在 P<0.05 水平上有显著性差异。

2.2　植物精油的 MIC 和 MBC

许超群等报道肉桂精油主要组分肉桂醛对金黄色葡萄球菌有很好的抑制效果[19],MIC 为 0.15 g/L。由表 2 可知,12 种植物精油 MIC 的范围为 0.98~125.00 g/L。本研究中 12 种精油对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、沙门氏菌均表现很好的抑制效果,且 MIC 小于 20.00 g/L 的有 8 种。有研究报道,革兰氏阴性细菌对精油抵抗力高于革兰氏阳性细菌[20],但本研究中并未发现相关规律,革兰氏阴性细菌大肠杆菌、沙门氏菌并未在 MIC 上高于革兰氏阳性细菌金黄色葡萄球菌。高原等也发现丁香精油对革兰氏阴性细菌和革兰氏阳性细菌的 MIC 和 MBC 没有差异,与本研究结果一致[21]。

MBC 高于 MIC,12 种精油中 MBC 最高为 500.00 g/L,最低为 3.91 g/L。马全朝等研究结果也表明,罗勒叶精油对 15 种大肠杆菌菌株的 MBC 较 MIC 有所增加[22]。许超群等报道肉桂精油主要组分肉桂醛对金黄色葡萄球菌 MBC 为 0.2 g/L[19]。

2.3　植物精油复配协同效果

选择对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、沙门氏菌 MBC 均不超过 125.00 g/L 的丁香、天竺葵、牛至、松针 4 种精油,两两复配后对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、沙门氏菌的 MIC 和 SI 结果见表 3,MIC 范围为 0.98~31.25 g/L,SI 范围为 0.375~12.000。

按照王宏军等 SI 的判定方法,SI ≤0.75 呈现协同作用,0.75<SI≤1.00 呈现相加作用,0.75>2.00 呈现拮抗作用[23]。由表 3 可以看出,对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌或沙门氏菌抑制具有协同增效作用的植物精油复配组合有 6 个,其中对 2 种致病菌同时表现协同增效的植物精油复配组合有 2 个。

2.4　复配植物精油对冷鲜鸡胸肉保鲜效果

选择同时对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌表现出协同抑制作用的牛至–松针复配组合,进行冷鲜鸡胸肉的保鲜评价,结果见图 1。对照组鸡胸肉冷藏过程中菌落总数、大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、沙门氏菌均随冷藏期的延长而上升;菌落总数、大肠杆菌、金黄色葡萄球菌在 2~5 d 内稍有增长,第 7 天较第 5 天有大幅度上升,而沙门氏菌第 5 天较第 2 天有大幅度上升,差异均达到显著水平(P<0.05)。牛至–松针复配精油处理组冷藏过程中,菌落总数、大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、沙门氏菌的上升幅度均受到抑制,自冷藏第 5 天起,牛至–松针复配精油处理

表 2　12 种植物精油对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、沙门氏菌的 MIC 和 MBC

Table 2　MIC and MBC values of 12 plant essential oils against *E. coli*, *Staphylococcus aureus*, and *Salmonella*

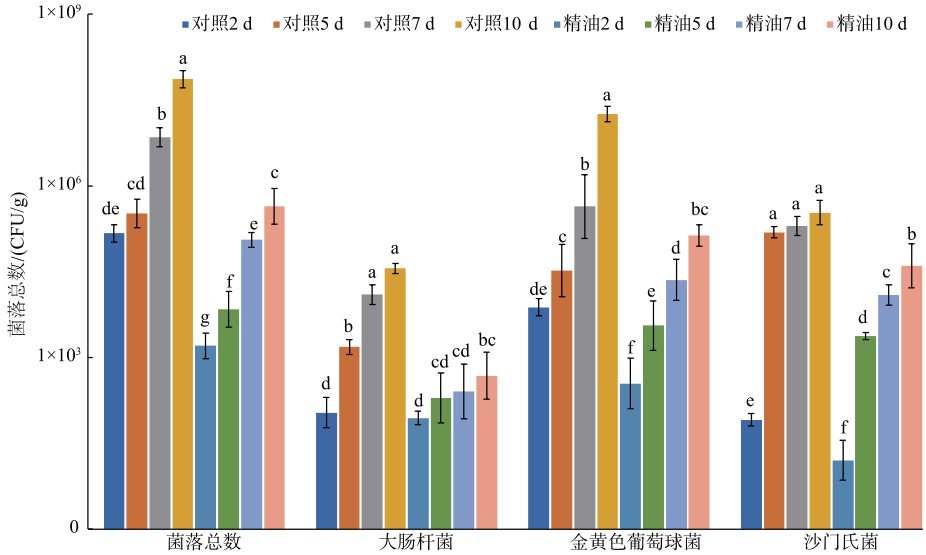
单位:g/L

精油	大肠杆菌		金黄色葡萄球菌		沙门氏菌	
	MIC	MBC	MIC	MBC	MIC	MBC
艾草	15.63	125.00	15.63	250.00	15.63	250.00
薄荷	3.91	500.00	3.91	500.00	3.91	500.00
雏春菊	1.95	500.00	7.81	500.00	1.95	500.00
丁香	1.95	3.91	1.95	7.81	3.91	7.81
芥末	15.63	62.50	15.63	250.00	15.63	62.50
罗勒	62.50	500.00	31.25	500.00	31.25	500.00
迷迭香	62.50	500.00	125.00	500.00	62.50	500.00
牛至	1.95	15.53	3.91	125.00	3.91	7.81
松针	3.91	15.53	7.81	125.00	3.91	15.63
天竺葵	3.91	125.00	3.91	125.00	7.81	125.00
香茅	125.00	500.00	125.00	500.00	0.98	500.00
樟脑	31.25	500.00	31.25	500.00	31.25	500.00

表 3　复配植物精油对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、沙门氏菌的 MIC 及 SI

Table 3　MIC and SI values of formulated plant essential oils against *E. coli*, *Staphylococcus aureus*, and *Salmonella*

菌种	指标	丁香–天竺葵		丁香–牛至		丁香–松针		天竺葵–牛至		天竺葵–松针		牛至–松针	
		丁香	天竺葵	丁香	牛至	丁香	松针	天竺葵	牛至	天竺葵	松针	牛至	松针
大肠杆菌	MIC/(g/L)	1.950	1.950	0.980	0.980	0.980	0.980	7.810	7.810	7.810	7.810	0.980	0.980
	SI	1.500		1.000		1.000		6.000		4.000		0.750	
金黄色葡萄球菌	MIC/(g/L)	1.950	1.950	7.810	31.250	3.910	1.950	1.950	1.950	1.950	1.950	0.980	0.980
	SI	1.500		12.000		2.250		1.000		0.750		0.375	
沙门氏菌	MIC/(g/L)	1.950	1.950	15.630	15.630	15.630	3.910	0.980	0.980	0.980	0.980	31.250	1.950
	SI	0.750		8.000		5.000		0.375		0.375		8.500	



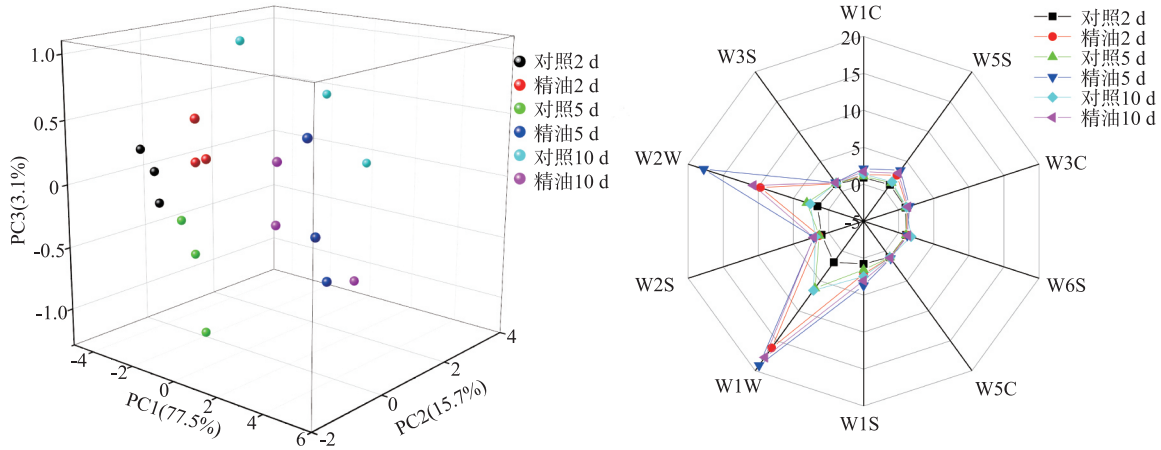
图中不同字母表示在 $P<0.05$ 水平上有显著性差异。

图 1　复配植物精油处理对鸡胸肉微生物的影响

Fig. 1　Effects of formulated plant essential oil on microorganisms in chicken breast

鸡肉的微生物水平(菌落总数、大肠杆菌和沙门氏菌)均显著低于同期对照,金黄色葡萄球菌水平对比同期对照略有降低。冷藏 10 d 时,牛至-松针复配精油处理的菌落总数、大肠杆菌和金黄色葡萄球菌与对照组第 5 天时没有显著差异,沙门氏菌则显著低于对照第 5 天(P<0.05)。综上,牛至-松针复配精油处理可延长冷鲜鸡胸肉的货架期 5 d,对金黄色葡萄球菌抑菌效果略有欠缺。综合分析牛至-松针复配精油处理组的菌相构成,金黄色葡萄球菌占比高于沙门氏菌,沙门氏菌高于大肠杆菌,其中金黄色葡萄球菌在 5~10 d 时增加幅度较大,沙门氏菌在 2~5 d 时增加幅度较大。

对不同处理的鸡胸肉样品进行电子鼻检测并进行 PCA。由图 2(a)看出,主成分PC1、PC2、PC3 的累积贡献率超过 95%,能反映样品整体信息。随冷藏时间延长,鸡胸肉风味发生变化。对照组冷藏 2 d 和冷藏 5 d 距离较小,表明风味比较接近,冷藏 10 d 时与冷藏 2 d 时冷藏较远,表明风味发生较大变化。牛至-松针复配精油处理对鸡胸肉风味有一定影响,冷藏 2 d 时,牛至-松针复配精油处理风味分布点与对照组冷藏 2 d 时距离较小,风味比较接近。牛至-松针复配精油处理冷藏鸡胸肉不同贮藏时间各点距离较对照组变化不大,表明风味变化的差异比对照组小。结合微生物检测结果,对照组冷藏 10 d 时微生物滋生严重,风味较前期变化较大,牛至-松针复配精油处理抑制了微生物滋生,相关样品的风味分布与对照 2 d 时的距离相对较近,两个指标结果相符,表明细菌腐败导致风味变化大于精油处理。利用雷达图分析电子鼻不同探头的风味响应值,发现牛至-松针复配精油处理后风味响应值在 W1W、W2W 探头有明显增加,见图 2(b)。



(a) 3D散点图　　(b) 雷达图

图 2　复配植物精油处理对鸡胸肉风味的影响

Fig. 2　Effects of formulated plant essential oil on flavor of chicken breast

分析不同探头响应值的显著性差异。由表 4 可知,植物精油组和对照组 W1W、W2W 的探头响应值差异显著(P<0.05),但不同贮藏时间的对照组之间无显著差异,表明探头响应值变化主要由精油处理导致。对照处理不同贮藏时间发现,探头 W1S 响应值在 2、5、10 d 时表现显著差异,表明探头的响应值可以反映鸡胸肉冷藏中风味的变化。微生物检测结果表明,对照鸡胸肉冷藏 10 d 时,微生物大量滋生,产品出现腐败,对照处理在探头 W1C、W3C、W6S、W5C、W2S、W3S 响应值表现为冷藏 10 d 时与 2、5 d 时差异显著,表明探头的响应值可以反映鸡胸肉腐败时风味的变化。其中探头 W6S 在牛至-松针复配精油处理不同贮藏时间时,响应值表现为冷藏 2 d 与 5 d、5 d 与 10 d 无显著差异,表明牛至-松针复配精油处理对响应值影响相对较小,可以在控制精油使用浓度的前提下,作为牛至-松针复配天然植物精油保鲜冷鲜鸡胸肉时品质变化的指示探头。

3 结　语

植物精油含有多种化学成分,杀菌谱广,是天然保鲜剂研发的主要原料[24]。综合抑菌圈、MIC、

表 4　复配植物精油保鲜的鸡胸肉在电子鼻响应值上的差异

Table 4　Differences in response values of electronic nose for chicken breast preserved with formulated plant essential oils

处理	W1C	W5S	W3C	W6S	W5C	W1S	W1W	W2S	W2W	W3S
对照 2 d	0.900±0.028^{d}	1.100±0.025^{e}	1.000±0.007^{e}	1.100±0.013^{d}	1.000±0.002^{d}	0.800±0.104^{e}	1.900±0.122^{b}	1.000±0.060^{b}	1.600±0.065^{c}	1.200±0.042^{d}
精油 2 d	1.300±0.050^{c}	2.700±0.293^{b}	1.200±0.033^{cd}	1.100±0.002^{cd}	1.100±0.012^{b}	2.200±0.118^{cd}	16.200±2.885^{a}	1.400±0.041^{b}	9.700±0.997^{b}	1.300±0.018^{cd}
对照 5 d	1.100±0.065^{d}	1.400±0.133^{c}	1.000±0.028^{e}	1.000±0.054^{d}	1.000±0.115^{cd}	1.600±0.307^{d}	6.200±2.058^{b}	1.300±0.092^{b}	3.100±0.709^{c}	1.300±0.064^{bcd}
精油 5 d	2.100±0.098^{a}	3.500±0.660^{a}	1.600±0.038^{a}	1.200±0.014^{bc}	1.200±0.013^{a}	3.700±0.077^{a}	19.100±5.971^{a}	2.100±0.034^{a}	17.800±1.914^{a}	1.500±0.075^{a}
对照 10 d	1.400±0.209^{c}	1.600±0.159^{c}	1.100±0.073^{d}	1.800±0.168^{a}	1.100±0.037^{bc}	2.500±0.756^{bc}	6.600±1.593^{b}	1.900±0.460^{a}	2.600±0.375^{c}	1.400±0.129^{abc}
精油 10 d	1.700±0.104^{b}	3.000±0.586^{ab}	1.300±0.038^{b}	1.300±0.189^{ab}	1.100±0.020^{a}	3.000±0.375^{b}	17.800±1.853^{a}	2.100±0.302^{a}	10.700±1.613^{b}	1.400±0.092^{ab}

注:同一列中的不同字母表示在 $P<0.05$ 水平上有显著性差异。

MBC 的研究结果,选择出丁香、天竺葵、牛至、松针 4 种植物精油,对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、沙门氏菌的 MIC 为 1.95~7.81 g/L。许璐等研究发现牛至油、香芹酚和百里香酚对常见致病菌株均有明显抑菌效果,其中牛至油对黄金葡萄球菌的 MIC 为 0.312 5 mL/L,与本研究结果相近[25]。提高植物精油的抑菌效果,是天然保鲜剂研发的技术关键。刘如楠等研究利用高速剪切方法制备褚橙精油纳米乳液,发现对大肠杆菌、变形杆菌和枯草芽孢杆菌的抑菌圈较纯精油显著增加[26]。对筛选出的 4 种植物精油进行复配协同增效研究,发现牛至-松针组合对大肠杆菌抑菌作用协同增效;天竺葵-松针和牛至-松针 2 种精油复配组合对金黄色葡萄球菌抑菌作用协同增效;丁香-天竺葵,天竺葵-牛至和天竺葵-松针精油复配组合对沙门氏菌抑菌作用协同增效。有研究发现龙蒿精油对沙门氏菌和金黄色葡萄球菌的 MIC 分别为 2.5 μL/mL 和 1.25 μL/mL[27]。本研究中天竺葵-松针精油复配对金黄色葡萄球菌、沙门氏菌抑菌作用同时增效,天竺葵、牛至单一组分对沙门氏菌 MIC 分别为 3.91、7.81 g/L,复配处理后 MIC 降低,对沙门氏菌 MIC 为0.98 g/L,低于已有报道的 MIC 结果[27]。

植物精油是美国药品监督管理局(FDA)认证为一般公认安全产品,利用其研发天然食品保鲜剂,安全程度和消费者接受程度都更有优势[28]。研究筛选的牛至-松针复配植物精油组合在第 5 天时明显抑制鸡胸肉冷藏期间菌落总数、大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、沙门氏菌的上升幅度,产品货架期延长了 5 d。Raeisi 等用大蒜精油处理预制鸡块,发现大蒜精油处理的鸡块在冷藏 20 d 时菌落总数才超过 1×10^{7} CFU/g 的安全标准,较对照货架期延长5 d[29]。本研究结果表明,牛至-松针复配植物精油处理鸡胸肉冷藏 10 d 时菌落总数仍未超过 1×10^{6} CFU/g。精油处理可能对产品风味产生影响是精油保鲜剂应用的问题之一。Sharma 等研究了包括丁香精油在内的 4 种植物精油对新鲜鸡肉肠微生物和品质的影响,发现精油添加对产品风味产生一定影响,但冷藏至第 10 天时,添加精油的鸡肉肠在风味评分上虽低于对照,但差异不再显著[30]。因此,植物精油可用于食品防腐保鲜,后续将开展使用剂量和使用方式的研究,研发满足不同种类食品的高效天然保鲜剂。

参考文献:

[1] 王紫璇,孙洁芳,邵兵. 食物中典型致病菌的快速检测研究进展[J]. 中国食品卫生杂志,2022,34(2):382-389.
WANG Z X,SUN J F,SHAO B. Research progress in rapid detection of typical pathogenic bacteria in food stuff[J]. **Chinese Journal of Food Hygiene**,2022,34(2):382-389. (in Chinese)

[2] PANIEL N,NOGUER T. Detection of *Salmonella* in food matrices,from conventional methods to recent aptamer-sensing technologies[J]. **Foods**,2019,8(9):371.

[3] DENAYER S,DELBRASSINNE L,NIA Y,et al. Food-borne outbreak investigation and molecular typing:high diversity of *Staphylococcus aureus* strains and importance of toxin detection[J]. **Toxins**,2017,9(12):407.

[4] COULOMBE G,CATFORD A,MARTINEZ-PEREZ A,et al. Outbreaks of *Escherichia coli* O157:H7 infections linked to romaine lettuce in Canada from 2008 to 2018:an analysis of food safety context[J]. **Journal of Food Protection**,2020,83(8):1444-1462.

[5] FRANK C,WERBER D,CRAMER J P,et al. Epidemic profile of Shiga-toxin-producing *Escherichia coli* O104:H4 outbreak in Germany[J]. **The New England Journal of Medicine**,2011,365(19):1771-1780.

[6] KARCH H,DENAMUR E,DOBRINDT U,et al. The enemy within us:lessons from the 2011 European *Escherichia coli* O104:H4 outbreak[J]. **EMBO Molecular Medicine**,2012,4(9):841-848.

[7] WANG X,TAO X Y,XIA X D,et al. Staphylococcus aureus and methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* in retail raw chicken in China[J]. **Food Control**,2013,29(1):103-106.

[8] 姚依妮,孙建明,李昭,等. 植物精油在果蔬保鲜中的研究进展[J]. 轻工科技,2021,37(5):17-18.
YAO Y N,SUN J M,LI Z,et al. Research progress of plant essential oil in fruit and vegetable preservation[J]. **Light Industry Science and Technology**,2021,37(5):17-18. (in Chinese)

[9] 慈颖,王思,王静,等. 植物源抗菌消毒剂研究进展[J]. 中国国境卫生检疫杂志,2020,43(4):297-300.
CI Y,WANG S,WANG J,et al. Research progress on botanical antibacterial disinfectant[J]. **Chinese Journal of Frontier Health and Quarantine**,2020,43(4):297-300. (in Chinese)

[10] 赵冬雪,杨晓溪,郎玉苗. 天然抗菌剂在食品抑菌保鲜中的研究进展[J]. 食品工业,2021,42(7):204-207.
ZHAO D X,YANG X X,LANG Y M. Research progress of natural antibacterial agents in food preservation[J]. **The Food Industry**,2021,42(7):204-207. (in Chinese)

[11] 刘德赞,李文茹,谢小保. 植物精油的抗菌性能及其应用研究进展[J]. 工业微生物,2021,51(5):53-57.
LIU D Z,LI W R,XIE X B. Research progress of antibacterial properties and application of plant essential oils[J]. **Industrial Microbiology**,2021,51(5):53-57. (in Chinese)

[12] MUTLU N. Physicochemical and antimicrobial properties of biodegradable films based on gelatin/guar gum incorporated with grape seed oil[J]. **Journal of Food Measurement and Characterization**,2023,17(2):1515-1525.

[13] IBRAHIM S S,SAHU U,KARTHIK P,et al. Eugenol nanoemulsion as bio-fumigant:enhanced insecticidal activity against the rice weevil,Sitophilus oryzae adults[J]. **Journal of Food Science and Technology**,2023,60(4):1435-1445.

[14] EL ATKI Y,AOUAM I,TAROQ A,et al. Antibacterial effect of combination of cinnamon essential oil and thymol,carvacrol,eugenol,or geraniol[J]. **Journal of Reports in Pharmaceutical Sciences**,2020,9(1):104.

[15] 邹月,黄金凤,魏琴,等. 不同提取时间的艳山姜挥发油组分分析及其抑菌活性研究[J]. 中国调味品,2020,45(3):62-66.
ZOU Y,HUANG J F,WEI Q,et al. Analysis of volatile oil components of Alpinia zerumbet at different extraction time and study on their antibacterial activity[J]. **China Condiment**,2020,45(3):62-66. (in Chinese)

[16] 梁伟雯,陈源,梁颖,等. 丹参酮胶囊对临床细菌分离株的体外抑菌作用[J]. 广东医学,2017,38(24):3792-3795.
LIANG W W,CHEN Y,LIANG Y,et al. Inhibitory effect of tanshinone capsule on clinical bacterial isolates *in vitro*[J]. **Guangdong Medical Journal**,2017,38(24):3792-3795. (in Chinese)

[17] 闫军,遇晓杰,王开利,等. 零售生鸡肉中沙门菌污染对居民健康影响的暴露评估[J]. 中国食品卫生杂志,2016,28(5):671-676.
YAN J,YU X J,WANG K L,et al. Quantitative microbiological risk assessment for *Salmonella* contamination in raw chicken from retail to table[J]. **Chinese Journal of Food Hygiene**,2016,28(5):671-676. (in Chinese)

[18] 阚浩鹏,李楠,胡豫杰,等. 济南市售生鸡肉中金黄色葡萄球菌污染状况及半定量风险评估研究[J]. 中国食品卫生杂志,

2022,34(5):968-973.
KAN H P,LI N,HU Y J,et al. Study on *Staphylococcus aureus* contamination and semi-quantitative risk assessment in raw chicken sold in Ji'nan[J]. **Chinese Journal of Food Hygiene**,2022,34(5):968-973. (in Chinese)

[19] 许超群,陈飞平,梁旭茹,等. 肉桂醛与 ε- 聚赖氨酸盐酸盐的抑菌活性及其协同抑菌机制初探[J]. 现代食品科技,2023,39(7):24-31.
XU C Q,CHEN F P,LIANG X R,et al. Preliminary investigation of the antimicrobial activities and synergies of cinnamaldehyde and ε-polylysine hydrochloride[J]. **Modern Food Science and Technology**,2023,39(7):24-31. (in Chinese)

[20] 段伟丽,刘艳秋,包怡红. 艾蒿精油的抑菌活性和稳定性[J]. 食品与生物技术学报,2015,34(12):1332-1337.
DUAN W L,LIU Y Q,BAO Y H. Study on antimicrobial activities and stability of essential oil from *Artemisia argyi* [J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**,2015,34(12):1332-1337. (in Chinese)

[21] 高原,王金鹤,庞兆越,等. 丁香精油对金黄色葡萄球菌及铜绿假单胞菌的抑制作用研究[J]. 化学与生物工程,2023,40(4):48-52.
GAO Y,WANG J H,PANG Z Y,et al. Antibacterial activity of clove essential oil against *Staphylococcus aureus* and *Pseudomonas aeruginosa*[J]. **Chemistry & Bioengineering**,2023,40(4):48-52. (in Chinese)

[22] 马全朝,唐明明,刘英丽,等. 罗勒叶精油对多重耐药鸡源大肠杆菌抑菌作用[J]. 现代畜牧科技,2023(2):22-25.
MA Q C,TANG M M,LIU Y L,et al. Antibacterial activity of basil leaf essential oil against multi drug resistant chicken *Escherichia coli*[J]. **Modern Animal Husbandry Science & Technology**,2023(2):22-25. (in Chinese)

[23] 王宏军,周铁忠,刘孝刚,等. 协同指数法筛选银翘天甘组方的最佳剂量配比[J]. 动物医学进展,2011,32(1):58-62.
WANG H J,ZHOU T Z,LIU X G,et al. Screening optimal dose ratio of Yinqiaotiangan compound by method of synergic index [J]. **Progress in Veterinary Medicine**,2011,32(1):58-62. (in Chinese)

[24] 钱卫东,刘婵婵,王婷,等. 丁香酚对多重耐药大肠杆菌的抑菌活性及其作用机制研究[J]. 现代食品科技,2019,35(1):31-36.
QIAN W D,LIU C C,WANG T,et al. Antibacterial activity and mechanism of eugenol against multidrug-resistant *Escherichia coli*[J]. **Modern Food Science and Technology**,2019,35(1):31-36. (in Chinese)

[25] 许璐,喻毅,曹宇,等. 牛至油及其主要成分的体外抑菌实验[J]. 世界中医药,2020,15(14):2072-2075.
XU L, YU Y, CAO Y, et al. Experimental study on antibacterial activity of oregano oil and its main components *in vitro*[J]. World Chinese Medicine,2020,15(14):2072-2075.(in Chinese)

[26] 刘如楠,黄凯,管骁,等. 褚橙精油纳米乳的制备及抑菌性[J]. 食品与生物技术学报,2020,39(5):59-67.
LIU R N,HUANG K,GUAN X,et al. Preparation and antibacterial activity of Chu orange essential oil nanoemulsion[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**,2020,39(5):59-67. (in Chinese)

[27] MOHAMMADI PELARTI S,KARIMI ZAREHSHURAN L,BABAEEKHOU L,et al. Antibacterial,anti-biofilm and anti-quorum sensing activities of *Artemisia dracunculus* essential oil (EO):a study against *Salmonella enterica* serovar *Typhimurium* and *Staphylococcus aureus*[J]. **Archives of Microbiology**,2021,203(4):1529-1537.

[28] 吴圣彬,谢晶. 植物性天然食品防腐剂的研究进展[J]. 广东农业科学,2013,40(23):110-113.
WU S B,XIE J. Research progress of natural food preservatives from plant materials[J]. **Guangdong Agricultural Sciences**,2013,40(23):110-113. (in Chinese)

[29] RAEISI S,OJAGH S M,POURASHOURI P,et al. Shelf-life and quality of chicken nuggets fortified with encapsulated fish oil and garlic essential oil during refrigerated storage[J]. **Journal of Food Science and Technology**,2021,58(1):121-128.

[30] SHARMA H,MENDIRATTA S K,AGARWAL R K,et al. Evaluation of anti-oxidant and anti-microbial activity of various essential oils in fresh chicken sausages[J]. **Journal of Food Science and Technology**,2017,54(2):279-292.

(责任编辑:张馨文)