

龙须菜挥发油的提取及抗菌抗虫活性研究

Extract of volatile oil and antibacterial & insecticidal activity of large red algae *Gracilaria lemaneiformis*

王国蕊¹ 逢锦龙² 张德蒙² 李 昉^{1,2}

WANG Guo-rui¹ PANG Jin-long² ZHANG De-meng² LI Fang^{1,2}

(1. 青岛科技大学海洋科学与生物工程学院, 山东 青岛 266000;

2. 青岛明月海藻集团有限公司海藻活性物质国家重点实验室, 山东 青岛 266400)

(1. College of Marine Science and Biological Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266000, China; 2. State Key Laboratory of Bioactive Seaweed Substances, Qingdao Brightmoon Seaweed Group Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266400, China)

摘要:分别采用直接水蒸气蒸馏法和溶剂提取-水蒸气蒸馏法提取龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*)挥发油,并进行气相色谱-质谱法(GC-MS)分析和抗菌抗虫活性研究。结果显示:相比于直接水蒸气蒸馏法,溶剂提取-水蒸气蒸馏法提取的龙须菜挥发油中气味阈值较低的醛类成分相对含量低至0.20%,而营养保健价值高的羧酸及酯类含量达到21.54%。龙须菜挥发油对大肠杆菌 O157 (*Escherichia coli* O157)、金黄色葡萄球菌 (*Staphylococcus aureus*)、沙门氏菌 (*Salmonella enterica*)、单增李斯特菌 (*Listeria monocytogenes*) 和副溶血性弧菌 (*Vibrio parahaemolyticus*) 5 种常见致病菌均有一定的抗菌活性;溶剂提取-水蒸气蒸馏法和直接水蒸气蒸馏法提取的龙须菜挥发油对卤虫的半数致死量 (LD_{50}) 分别为 0.126、0.162 mg/mL。

关键词:龙须菜;挥发油;抗菌;抗虫;水蒸气蒸馏法;溶剂提取-水蒸气蒸馏法;气相色谱-质谱法

Abstract: The volatile oil of *Gracilaria lemaneiformis* was extracted by direct steam distillation and solvent extraction-steam distillation, meanwhile gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) and antibacterial & insecticidal activity were conducted. The GC-MS showed that compared with direct steam distillation extraction, in solvent extraction-steam distillation extraction the relative content of

aldehyde compounds which has lower odor threshold is 0.20%, meanwhile the relative content of carboxylic acid and ester is 21.54% in solvent extraction-steam and distillation extraction. The antibacterial activity of volatile oil on 5 kinds of pathogens (*Escherichia coli* O157, *Staphylococcus aureus*, *Salmonella enterica*, *Listeria monocytogenes*, *Vibrio parahaemolyticus*) is moderate, and the median lethal dose LD_{50} of volatile oil compounds in *G. lemaneiformis* with solvent extraction-steam distillation and direct steam distillation broth were 0.126 and 0.162 mg/mL respectively.

Keywords: *Gracilaria lemaneiformis*; volatile oil; antibacterial activity; insecticidal activity; direct steam distillation; solvent extraction-steam distillation; GC-MS

龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*)隶属于红藻门杉藻目江蓠属,多生长于潮间带至潮下带的半埋于覆盖有沙的岩石上^[1]。目前已从龙须菜中分离出多种化合物^[2-3],具有调节免疫、抗肿瘤^[4-5]、抗病毒、抗突变^[6]、抗凝血、抗氧化^[5]、抗菌等多种生理活性及药用功能^[7]。但对龙须菜挥发油的成分以及抗菌活性研究还相对较少,对龙须菜挥发油的抗虫活性也未见报道。

值得关注的是潮间带海藻的挥发和半挥发性成分具有很好的抗菌和抗氧化等活性,可用于开发药品或者保健品^[8]。同时,同种植物的挥发油用不同的方法提取在成分以及活性方面有较大差异^[9]。因此本研究以龙须菜为对象,利用气相色谱-质谱分析方法对比不同提取方法得到的挥发油成分,分析挥发油主体成分,并研究比较 2 种挥发油对几种常见致病菌抗菌作用以及对卤虫杀虫活性的差异,旨在探索龙须菜挥发油的最佳提取方法,并为扩展大型红藻龙须菜的应用范围提供一定理论依据。

基金项目:海藻活性物质国家重点实验室开放基金项目(编号:SKL-BASS1717);国家自然科学基金项目(编号:41106136);山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(编号:BS2012NY002);青岛市科技计划基础研究项目(编号:1314144-JCH);地方高校国家级大学生创新创业训练计划项目(编号:201602003)

作者简介:王国蕊,男,青岛科技大学在读硕士研究生。

通信作者:李昉(1975—),女,青岛科技大学副教授,博士。

E-mail: fangli@qust.edu.cn

收稿日期:2017-12-15

1 材料与方法

1.1 材料和仪器

1.1.1 材料与试剂

龙须菜:于2016年5月采于山东威海养殖场;

大肠杆菌 O157(*Escherichia coli* O157)、金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)、沙门氏菌(*Salmonella enterica*)、单增李斯特菌(*Listeria monocytogenes*)、副溶血性弧菌(*Vibrio parahaemolyticus*):中国水产科学研究院黄海水产研究所;

LB培养基:蛋白胨 10 g,酵母浸膏 5 g,氯化钠 10 g,琼脂 20 g,去离子水 1 000 mL,pH 7.2~7.4;

其他试剂均为分析纯。

1.1.2 主要仪器设备

气相色谱联用仪:GCMS-QP2010 型,日本岛津公司;

旋转蒸发器:RE-52AA 型,上海亚荣生化仪器厂;

循环水式多用真空泵:SHZ-95B 型,巩义市予华仪器有限责任公司;

冷冻干燥机:FD-1A-80 型,上海比朗仪器制造有限公司;

立式压力蒸汽灭菌器:BXN-30R 型,上海博迅实业有限公司医疗设备厂。

1.2 试验方法

1.2.1 直接水蒸气蒸馏法 将 1 kg 新鲜龙须菜冷冻干燥,粉碎,对龙须菜粉末直接进行水蒸气蒸馏得龙须菜挥发油(D-GLS),用重蒸二氯甲烷萃取,密封待测。

1.2.2 溶剂提取-水蒸气蒸馏法 将 1 kg 新鲜龙须菜晾干至恒重,粉碎,浸泡于等体积重蒸甲醇中,提取 3 次,超声辅助、浸提均为 24 h,将浸提液于减压旋转蒸发器中蒸干,得龙须菜粗提物浸膏。最后对粗提物浸膏进行水蒸气蒸馏得到龙须菜挥发油(S-GLS),用重蒸二氯甲烷萃取,密封待测。

1.2.3 GC-MS 分析条件

(1) 气相色谱条件:柱箱温度 50 ℃,进样口温度 250 ℃,进样量 1 μL,不分流,进样时间 1 min;载气 He,压力 100 kPa,总流量 50 mL/min,柱流量 1.69 mL/min;柱温从 50 ℃开始,维持 0 min,以 5 ℃/min 升温到 220 ℃,维持 5 min,再以 5 ℃/min 升温到 300 ℃,维持 0 min。

(2) 质谱条件:EI 离子源,电离源(70 eV),离子源温度 200 ℃,接口温度 300 ℃,溶剂延迟时间 3 min,质量数扫描范围为 35~500 m/z 。

1.2.4 化合物结构与含量分析 利用仪器自带谱库进行检索,确定化合物结构,只报道相似度>80%的物质,采用色谱峰面积归一化法确定各组分相对含量,用百分比表示。

1.2.5 抗菌试验 将 D-GLS 挥发油和 S-GLS 挥发油分别用色谱甲醇溶解,浓度均为 10 mg/mL,阳性对照为 4 mg/mL 阿莫西林的二甲基亚砜(DMSO)溶液。各取样品 5 μL 到滤纸片(直径 6 mm),晾干,贴到涂菌的 LB 固体平板上,置于 37 ℃培养 24 h,观察抑菌圈大小。按式(1)计算抑菌率。

$$c = \frac{d_1 - d_0}{d_2 - d_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

c ——抑菌率,%;

d_0 ——滤纸片直径,mm;

d_1 ——供试样品抑菌圈直径,mm;

d_2 ——阳性对照,mm。

1.2.6 抗卤虫活性试验 参照李昉等^[10]的方法,取 190 μL 卤虫幼虫悬浮液,加入到 96 孔板中,每孔卤虫控制在 16 条左右。用 DMSO 将两种挥发油配制成梯度溶液,每孔加入样品 10 μL,使其最终浓度分别为 0.06,0.08,0.10,0.12,0.14,0.16,0.18,0.20 mg/mL,并设置海水和 DMSO 对照,每个样品做 6 个平行。在 25 ℃下培养 24 h,记录卤虫死亡个数,计算死亡率和半致死浓度 LD_{50} 。

2 结果与分析

2.1 不同提取方法的龙须菜挥发性成分

根据水蒸气蒸馏法得到的 D-GLS 挥发油,经 GC-MS 分析后得龙须菜挥发油总离子流色谱图(图 1),该方法得到的挥发油组分在 3.085 min 开始出峰并且在 25~35 min 集中出峰,由表 1 可知,共得到 68 种成分,包括烷烃 20 种、烯烃 6 种、醛类 9 种、醇类 12 种、酮类 3 种、羧酸及酯 15 种和其它化合物 3 种。其中相对含量>5%的化合物依次有:2-辛烯醛(22.29%)、二十烷(18.84%)、4-亚乙烯基环己烯(7.81%)和 1-辛烯-3-醇(6.91%)。而采用溶剂提取-水蒸气蒸馏法得到的 S-GLS 挥发油,经 GC-MS 分析后得龙须菜挥发油总离子流色谱图(图 2),该方法得到的挥发油组分出峰时间集中

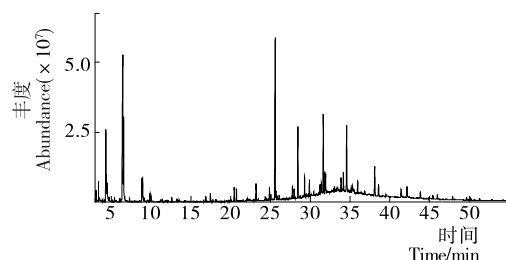


图 1 直接水蒸气蒸馏法所得龙须菜挥发油成分 GC-MS 谱图

Figure 1 TIC chromatograms of volatile oil compounds in *G. Lemaneiformis* with direct steam distillation

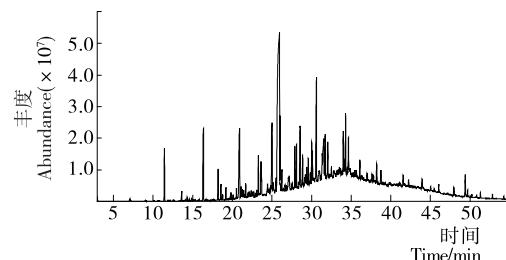


图 2 溶剂提取-水蒸气蒸馏法所得龙须菜挥发油成分 GC-MS 谱图

Figure 2 TIC chromatograms of volatile oil compounds in *G. Lemaneiformis* with solvent extraction-steam distillation

在 20~35 min,由表 2 可知,共得到 56 种成分,包括烷烃 20 种、醛类 1 种、醇类 6 种、酮类 2 种、羧酸及酯 17 种和其它化合物 10 种。其中相对含量>5% 的化合物有:二十烷(37.41%)和棕榈酸甲酯(6.89%)。由图 3 可知,S-GLS 挥发油相对于 D-GLS 挥发油,其醛类成分由 24.69%下降至 0.2%,羧酸及酯类成分由 9.02%提高至 21.54%,在一定程度上说明,直接水蒸气蒸馏挥发油成分可能会导致羧酸氧化,醛类成分增加。总体来看,烃类和羰基类化合物是龙须

菜挥发油的主体成分。
2.2 对龙须菜挥发油主体成分解析
2.2.1 烃类化合物 由图 3 可知,烃类化合物是龙须菜挥发油的最主要成分,嗅觉阈值多数较高,对挥发油的气味贡献不大。直接水蒸气蒸馏法和溶剂提取-水蒸气蒸馏法提取的挥发油中烷烃含量分别为 38.98%和 60.01%,另外直接水蒸气蒸馏法提取的挥发油中还有 10.41%的烯烃,其中角鲨烯是一种直链三萜化合物,具有类似红细胞摄氧功能,可生成

表 1 直接水蒸气蒸馏法所得龙须菜挥发油成分
Table 1 Volatile oil compounds in *G. Lemaneiformis* with direct steam distillation

化合物 种类	保留时间/ min	化合物名称	相对含量/ %	化合物 种类	保留时间/ min	化合物名称	相对含量/ %
烷烃	4.482	2,2,4,4-四甲基戊烷	2.00	醇类	4.701	4-庚烯醇	0.15
	18.124	十四烷	0.17		6.265	2-庚烯-1-醇	0.18
	20.722	十五烷	0.92		6.550	1-辛烯-3-醇	6.91
	23.192	十六烷	1.10		8.841	2-辛烯-1-醇	1.90
	24.352	2,6,10-三甲基十五烷	0.42		9.058	2-辛炔-1-醇	0.24
	24.515	正癸基环己烷	0.15		8.936	3-环己烯基-1-乙醇	2.09
	25.605	二十烷	18.84		9.857	2-甲基-1-羟甲基-1-环己烯	0.63
	25.691	姥鲨烷	0.78		9.982	2,6-二甲基环己醇	0.60
	27.767	十八烷	0.94		20.059	十二醇	0.14
	27.977	植烷	1.09		29.493	十九醇	0.29
	31.324	十三烷基环己烷	0.23	酮类	34.074	二十一醇	0.14
	31.935	二十一烷	3.89		34.163	叶绿醇	1.51
	32.696	二十五烷	0.15		6.686	5-甲基-3-庚酮	0.29
	35.132	二十九烷	0.49		20.445	β -紫罗兰酮	0.96
	35.335	三十五烷	0.38	羧酸及酯	28.753	植酮	0.24
	35.467	十五烷基环己烷	0.63		16.871	2-甲基-1-叔丁基-1,3-丙二醇单 异丁酸酯	0.40
	35.957	二十二烷	1.83		17.451	2,4,4-三甲基-1,3-戊二醇单异 丁酸酯	0.61
	38.584	二十四烷	3.28		21.567	二氢猕猴桃内酯	0.13
	43.837	三十六烷	1.47		27.650	肉豆蔻酸乙酯	0.19
	49.647	四十烷	0.22		28.655	五氟丙酸三十六酯	0.23
烯烃	3.392	1,3-辛二烯	1.06		29.288	邻苯二甲酸二异丁酯	1.48
	4.305	4-亚乙烯基环己烯	7.81		30.440	棕榈酸甲酯	0.29
	4.431	1-乙基-1,4-环己二烯	0.64		31.231	邻苯二甲酸二丁酯	1.05
	5.405	2,4,6-辛三烯	0.28		31.406	9-十六碳烯酸乙酯	0.96
	25.056	3-十七烯	0.49		31.830	棕榈酸乙酯	1.70
	50.177	角鲨烯	0.13		32.090	七氟丁酸二十酯	0.15
	3.085	正己醛	0.56		32.922	花生四烯酸(ARA)	0.31
	4.738	庚醛	0.28		33.048	二十碳五烯酸(EPA)	0.59
	6.061	苯甲醛	0.34		35.267	油酸乙酯	0.69
	6.463	2-辛烯醛	22.29	其它	39.521	二十碳五烯酸(EPA)乙酯	0.24
醛类	7.292	2,4-庚二烯醛	0.23		13.273	苯并噻唑	0.20
	11.232	2,6-壬二烯醛	0.14		27.395	菲	0.26
	12.607	2,2,6-三甲基-1,3-环己二烯-1- 甲醛	0.31		34.019	1,54-二溴五十四烷	0.17
	13.209	β -环柠檬醛	0.18				
	25.883	十四醛	0.36				

表 2 溶剂提取-水蒸气蒸馏法所得龙须菜挥发油成分

Table 2 Volatile oil compounds in *G. Lemaniformis* with solvent extraction-steam distillation

化合物 种类	保留时间/ min	化合物名称	相对含量/ %	化合物 种类	保留时间/ min	化合物名称	相对含量/ %
烷烃	22.118	2-环己基二十烷	0.20	酮类	20.445	β -紫罗兰酮	0.34
	22.566	3-甲基十五烷	0.24		28.753	植酮	1.64
	23.304	十八烷	3.02		19.841	3-羟基十四烷酸甲酯	0.35
	24.352	2,6,10-三甲基十五烷	0.63		21.567	二氢弥胡桃内酯	0.59
	25.605	二十烷	37.41		22.669	2-甲基烯丙基富马酸乙酯	0.22
	27.082	2-甲基十七烷	1.23		24.880	3-羟基十二烷酸甲酯	0.29
	27.249	3-甲基十七烷	0.25		26.276	肉豆蔻酸甲酯	0.95
	27.977	植烷	1.99		27.201	肉豆蔻酸	0.88
	29.239	二十八烷	1.11		28.437	十五烷酸甲酯	0.22
	31.935	二十一烷	2.16	羧酸 及酯	29.288	邻苯二甲酸二异丁酯	0.67
	32.828	四十烷	2.25		30.138	棕榈油酸甲酯	1.02
	33.537	角鲨烷	1.35		30.440	棕榈酸甲酯	6.89
	34.765	8-己基十五烷	0.60		31.231	邻苯二甲酸二丁酯	1.66
	35.015	2,4-二甲基二十烷	0.29		31.555	棕榈酸	4.39
	35.165	四十四烷	1.05		33.901	8,11-十八碳二烯酸甲酯	0.58
	36.320	三十二烷	0.21		34.136	油酸甲酯	1.23
	38.584	二十四烷	2.47		34.532	十八烷酸甲酯	0.62
	39.847	三十烷	0.32		37.654	花生四烯酸(ARA)甲酯	0.60
	43.837	三十六烷	2.95		37.843	二十碳五烯酸(EPA)甲酯	0.38
	44.155	五十四烷	0.28		13.643	2-氨基-4-甲氧基苯酚	0.49
醛类	18.794	2-甲基-5-异丙烯基环戊-1-烯 甲醛	0.20		21.136	N-(2-苯乙基)乙酰胺	0.53
	29.493	十九醇	1.05		25.147	十四甲基醚	0.90
醇类	30.978	2-己基-1-癸醇	1.63		27.395	菲	0.30
	33.218	9-十八烯-1-醇	1.23	其它	32.227	1-十六烷磺酰氯	0.36
	33.681	二十四醇	1.05		33.391	茺菝	0.59
	34.163	叶绿醇	3.17		34.019	1,54-二溴五十四烷	2.54
	38.045	三十醇	0.24		34.435	苾	0.38
					35.672	硬脂酸酰胺	0.66
					49.420	芥酸酰胺	1.15

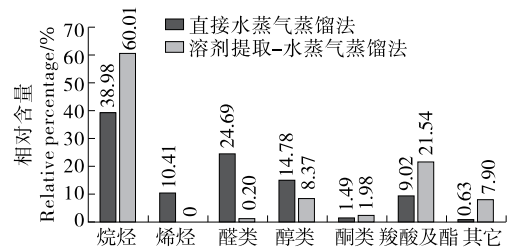


图 3 2 种提取方法所得龙须菜挥发油组成与含量
Figure 3 The volatile oil composition and content from two extraction methods in *G. Lemaniformis*

活化的氧化角鲨烯,促进新陈代谢,提高机体免疫力,因而常作为功效成分添加于保健食品中^[11]。2 种方法提取的挥发油中饱和烷烃均是其主要物质,而徐年军等^[12]所得龙须菜挥发油的结果是以烯烃(61.67%)为主要成分,可能与龙须菜的生长季节、龙须菜挥发性物质的提取方法和检测条件

有关。
2.2.2 醛类化合物 醛类化合物主要是脂肪氧化的产物^[13],具有较低的嗅觉阈值,是挥发油气味的主要来源。由表 1 和图 3 可知,直接水蒸气蒸馏法醛类含量为 24.69%。其中 2-辛烯醛含量最高(为 22.29%),其嗅觉阈值非常低(3 $\mu\text{g}/\text{kg}$),具有脂肪和黄瓜味^[14],是气味的主要贡献者。还检测出 2,6-壬二烯醛、2,4-庚二烯醛、正己醛、庚醛和十四醛,通常会呈现出辛辣和令人不愉快的腥味、脂肪味、草味等刺激性味道^[15]。而溶剂提取-水蒸气蒸馏法只检测到 0.2%的 2-甲基-5-异丙烯基环戊-1-烯甲醛,大大降低了挥发油的不良气味。
2.2.3 醇类化合物 醇类化合物相比于醛类一般嗅觉阈值较高。由表 1 和图 3 可知,直接水蒸气蒸馏法挥发油中醇类含量为 14.78%,其中 1-辛烯-3-醇为 6.91%,且嗅觉阈值较低(10 $\mu\text{g}/\text{kg}$)^[16],具有类似蘑菇香气和泥土味^[17]。叶绿醇是

双萜类化合物，具有花香和脂香气，是合成维生素 K 及维生素 E 的原料，具有一定的抗氧化作用^[18]。由表 2 和图 3 可知，溶剂提取-水蒸气蒸馏法挥发油中只有 8.37%，多为嗅觉阈值更高的饱和醇，而具有抗氧化作用的叶绿醇含量从 1.15% 提高到 3.17%。

2.2.4 酮类化合物 酮类化合物是由于不饱和和脂肪热氧化和氨基酸降解，嗅觉阈值比醛类高^[19-20]。由表 1、2 可知，2 种方法均检测出少量 β -紫罗兰酮和植酮。 β -紫罗兰酮为萜类物质，在一些海洋真菌和藻类中都有存在^[21-22]，具有紫罗兰香和木香，有抗真菌作用，此外还具有较强的抑癌作用^[23-24]。

2.2.5 羧酸及酯类化合物 由图 3 可知，羧酸及酯类化合物相比于直接水蒸气蒸馏法，溶剂提取-水蒸气蒸馏法使羧酸及酯类含量从 9.02% 提高到 21.54%。由表 1、2 可知，2 种挥

发油中都检测出包括花生四烯酸 (ARA) 和二十碳五烯酸 (EPA) 等多种多不饱和脂肪酸 (PUFAs)，PUFAs 对人体有非常重要的生理功能，可以调节人体脂质代谢、增加血管弹性、降血压、降血脂、预防心脑血管疾病，促进生长发育，此外对抗癌、抗糖尿病、抗氧化、抗炎、调节免疫、延缓衰老、减肥、美容等方面均具有重要的生理作用^[25-26]。

2.3 龙须菜挥发油抗菌作用

由表 3 可知，溶剂提取-水蒸气蒸馏法龙须菜挥发油在浓度为 10 mg/mL 条件下对金黄色葡萄球菌、单增李斯特菌、大肠杆菌 O157、沙门氏菌和副溶血性弧菌均有一定抗菌作用，且抑菌作用均优于直接水蒸气蒸馏法的，抑菌效果为副溶血性弧菌 > 单增李斯特菌 > 沙门氏菌 > 大肠杆菌 O157 > 金黄色葡萄球菌，其中对副溶血性弧菌抑菌率最高，可达 17.69%。

表 3 龙须菜挥发油的抑菌作用

Table 3 The bacteriostatic action of volatile oil in *G. Lemaneiformis*

组分	大肠杆菌 O157		金黄色葡萄球菌		沙门氏菌		单增李斯特菌		副溶血性弧菌	
	抑菌直径/	抑菌率/	抑菌直径/	抑菌率/	抑菌直径/	抑菌率/	抑菌直径/	抑菌率/	抑菌直径/	抑菌率/
	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
阿莫西林	24.28	100.00	31.88	100.00	28.38	100.00	37.19	100.00	15.95	100.00
D-GLS 挥发油	6.43	2.36	6.26	1.02	6.00	0.00	7.38	4.42	7.40	14.07
S-GLS 挥发油	6.58	3.15	6.66	2.55	6.76	3.40	7.58	5.07	7.76	17.69

2.4 龙须菜挥发油抗虫活性

由图 4 可知，随着浓度的升高，挥发油对卤虫的杀虫活性明显增强。在相同浓度条件下，溶剂提取-水蒸气蒸馏法龙须菜挥发油的杀虫活性均高于直接水蒸气蒸馏法的。2 种挥发油在 0.16 mg/mL 的浓度条件下，对卤虫的致死率均超过 50%。

由图 4 数据可模拟计算，溶剂提取-水蒸气蒸馏法龙须菜挥发油和直接水蒸气蒸馏法龙须菜挥发油对卤虫 LD_{50} 分别为 0.126、0.162 mg/mL，且 2 种挥发油杀虫活性要明显高于敌敌畏、氯氰菊酯和氧乐果 3 种常见化学农药的^[12]。

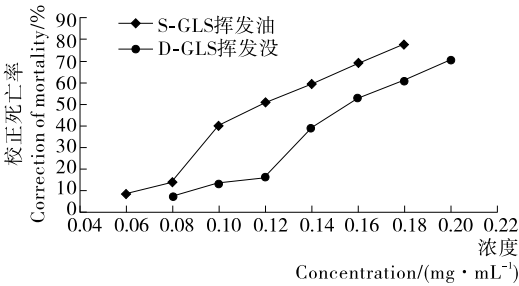


图 4 龙须菜挥发油的杀虫活性结果

Figure 4 The insecticidal activities of volatile oil in *G. Lemaneiformis*

3 结论

(1) 相比于直接水蒸气蒸馏法，溶剂提取-水蒸气蒸馏法得龙须菜挥发油营养价值较高，含有较高的羧酸及酯类。提取方法对挥发油成分产生明显影响。

(2) 龙须菜挥发油具有一定的广谱抗菌能力和较好的杀虫活性。溶剂提取-水蒸气蒸馏法是获得高活性龙须菜挥发油的有效方法。

(3) 本研究成果得龙须菜挥发油对卤虫有较强的杀虫活性，证明该挥发油具有作为生物农药的可能，为扩展大型红藻龙须菜的应用范围提供了一定理论依据。由于尚未明确挥发油中抗虫抗菌的活性物质是哪些单体化合物及可能的机理，今后需要在这些方面继续深入开展研究工作。

参考文献

[1] 曾呈奎. 中国黄渤海海藻[M]. 北京：科学出版社，2009：180.
[2] LU Hui-ming, XIE Hai-hui, GONG Ying-xue, et al. Secondary metabolites from the seaweed *Gracilaria lemaneiformis* and their allelopathic effects on *Skeletonema costatum*[J]. Biochem Syst Ecol, 2011, 39(4/5/6): 397-400.
[3] 陆崇玉, 邓赞, 梅玲, 等. 龙须菜化学成分研究[J]. 中草药, 2011, 42(6): 1 069-1 071.
[4] 梅文莉, 戴好富, 徐军田. 龙须菜的有机酸组成及其细胞毒活性[J]. 中国海洋药物, 2006, 25(2): 45-47.
[5] 陈美珍, 余杰, 廖灶辉, 等. 龙须菜多糖抑瘤活性及对荷瘤小鼠抗氧化作用的研究[J]. 中国海洋药物, 2008, 27(2): 46-49.
[6] 陈美珍, 余杰, 龙梓洁, 等. 龙须菜多糖抗突变和清除自由基作用的研究[J]. 食品科学, 2005, 26(7): 219-222.
[7] 陆崇玉, 邓赞, 宋欣, 等. 龙须菜活性成分的研究开发进展[J]. 时珍国医国药, 2011, 23(3): 711-712.

(下转第 175 页)

质。后续将对野菊茎叶多糖的其他生物活性以及构效关系进行进一步的研究。

参考文献

- [1] 王淑荣, 焦锁国. 火焰原子吸收光谱法测定陕西秦岭不同地域野菊花中的微量元素[J]. 光谱实验室, 2013, 30(1): 325-328.
- [2] BUI T T L, BUI H T, NGUYEN P T, et al. Anti-inflammatory components of *Chrysanthemum indicum* flowers[J]. Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters, 2015, 25(2): 266-269.
- [3] 郑艺欣, 李奕君, 林埔, 等. 野菊花水提物对果蝇热耐受能力的影响[J]. 食品与机械, 2016, 32(9): 141-144.
- [4] 陶金华, 段金殿, 钱大玮, 等. 菊属药用植物资源化学研究进展[J]. 中国现代中药, 2016, 18(9): 1 212-1 219.
- [5] WANG Jun-song, ZHOU Jing, KONG Ling-yi. Three new germacran-type sesquiterpene stereoisomers from the flowers of *Chrysanthemum indicum*[J]. Fitoterapia, 2012, 83(8): 1 675-1 679.
- [6] LEE B H, NAM T G, PARK W J, et al. Antioxidative and neuroprotective effects of volatile components in essential oils from *Chrysanthemum indicum* linné flowers[J]. Food Sci. Biotechnol, 2015, 24(2): 717-723.
- [7] DU Ning-ning, TIAN Wei, ZHEN Dong-fang, et al. Extraction, purification and elicitor activities of polysaccharides from *Chrysanthemum indicum*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 82: 347-354.
- [8] KIM S J, LEE K T, CHOI H E, et al. Anti-inflammatory effects of flavonoids in Korean *Chrysanthemum* species via suppression of inducible nitric oxide synthase and cyclooxygenase-2 in LPS-induced RAW 264.7 Macrophages[J]. Food Sci. Biotechnol, 2015, 24(3): 975-985.
- [9] 王桃云, 邱业先, 李斌, 等. 野菊花黄色素提取工艺探索[J]. 食品与机械, 2002, 28(1): 26-27.
- [10] 申海进, 郭巧生, 房海灵. 野菊花乙醚提取物的理化性质及抗氧化能力[J]. 食品科学, 2012, 33(15): 43-47.
- [11] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 一部[M]. 2015 年版. 北京: 中国医药科技出版社, 2015: 314.
- [12] 吴雪松, 许凌, 张铁军, 等. 野菊的化学成分及质量评价研究进展[J]. 中草药, 2015, 46(3): 443-452.
- [13] 刘晓丹, 刘存芳, 赖普辉, 等. 野菊花茎叶挥发油的化学成分及其对植物病原真菌抑制作用[J]. 食品工业科技, 2013, 34(24): 98-100.
- [14] 陆颖. 碱溶性野菊花多糖的结构分析及免疫活性研究[D]. 南京: 南京中医药大学, 2013: 1-26.
- [15] 卫强, 孙晓燕. 菊叶中多糖的含量测定方法研究[J]. 中成药, 2011, 33(3): 532-534.
- [16] 宫江宁, 饶玉, 杨义菊, 等. 大孔树脂吸附纯化黔产龙胆草多糖工艺优化[J]. 食品与机械, 2017, 33(5): 178-181.
- [17] 田光辉, 刘存芳, 辜天琪, 等. 野生藿香中多糖的提取与测定及抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2010, 31(2): 249-251.
- (上接第 153 页)
- [8] KARABAY-YAVASOGLU N U, SUKATAR A, OZDEMIR G, et al. Antimicrobial activity of volatile components and various extracts of the red alga *Jania rubens*[J]. Phytother Res, 2007, 21(2): 153-156.
- [9] 卫强, 鲁轮, 龙先顺, 等. 提取方法对木槿叶挥发油成分及其对肺癌 A549 细胞抑制作用的影响[J]. 食品与机械, 2016, 32(4): 160-166.
- [10] 李昉, 杜方鹏. 一株牛蒡共生真菌杀虫活性的研究[J]. 天然产物研究与开发, 2014, 26(9): 1 357-1 360.
- [11] 邱春媚, 殷光玲. 角鲨烯软胶囊提高缺氧耐受力的研究[J]. 中国粮油学报, 2013, 28(2): 52-54.
- [12] 徐年军, 何艳丽, 唐军, 等. 龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*) 高温逆境代谢产物的 GC-MS 分析[J]. 海洋与湖沼, 2009, 40(2): 221-227.
- [13] TIES P, BARRINGER S. Influence of lipid content and lipoxigenase on flavor volatiles in the tomato peel and flesh[J]. J Food Sci, 2012, 77(7): C830-C837.
- [14] 张红燕, 李晔, 袁贝, 等. 金枪鱼油冬化前后脂肪酸含量和主体风味的解析[J]. 核农学报, 2017, 31(2): 314-324.
- [15] 施文正, 王锡昌, 陶宁萍, 等. 致死方式对养殖草鱼肉挥发性成分的影响[J]. 水产学报, 2011, 35(3): 456-465.
- [16] 王雪峰, 涂行浩, 吴佳佳, 等. 草鱼的营养评价及关键风味成分分析[J]. 中国食品学报, 2014(12): 182-189.
- [17] CHEN De-wei, ZHANG Min. Analysis of volatile compounds in Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) [J]. J Food Drug Anal, 2006, 14(3): 297-303.
- [18] 周书娟. 褐藻羊栖菜等化学成分及其抗氧化活性的研究[D]. 温州: 温州大学, 2015: 21-24.
- [19] SUN S M, CHUNG G H, SHIN T S. Volatile compounds of the green alga, *Capsosiphon fulvescens* [J]. J Appl Phycol, 2012, 24(5): 1 003-1 013.
- [20] FRATINII G, LOIS S, PAZOS M, et al. Volatile profile of Atlantic shellfish species by HS-SPME GC/MS[J]. Food Res Int, 2012, 48(2): 856-865.
- [21] KAMENARSKA Z, IVANOVA A, STANCHEVA R, et al. Volatile compounds from some Black Sea red algae and their chemotaxonomic application[J]. Bot Mar, 2006, 49(1): 47-56.
- [22] ABDELBAKY H H, SHALLAN M A, BAROTY G E, et al. Volatile compounds of the microalga *Chlorella vulgaris* and their phytotoxic effect[J]. Pak J Biol Sci, 2002, 5(1): 61-65.
- [23] 刘家仁, 陈炳卿, 杨艳梅, 等. β -紫罗兰酮抑制 SGC-7901 细胞潜在的转移作用[J]. 卫生研究, 2005, 34(4): 435-438.
- [24] DONG Hong-wei, ZHANG Shuang, SUN Wen-guang, et al. β -Ionone arrests cell cycle of gastric carcinoma cancer cells by a MAPK pathway[J]. Arch Toxicol, 2013, 87(10): 1 797-1 808.
- [25] 王萍, 张银波, 江木兰. 多不饱和脂肪酸的研究进展[J]. 中国油脂, 2008, 33(12): 42-46.
- [26] 孙翔宇, 高贵田, 段爱莉, 等. 多不饱和脂肪酸的研究进展[J]. 食品工业科技, 2012, 33(7): 418-423.