

艾蒿挥发油对蚊虫防治作用的研究进展

钟肖飞, 张华*

(山东中医药大学药学院, 济南 250000)

[摘要] 艾蒿(*Artemisia argyi*)为多年生芳香草本植物,2015年版《中国药典》记载其具温经止血、散寒止痛、外用祛湿止痒功效,其含有多活性成分,具有较高的食用和药用价值。艾蒿中主要包括挥发油类、黄酮类、多糖类和鞣质类等化合物,其中挥发油类化合物具有抗氧化、抗炎、抗肿瘤和抑菌等多种生物活性,同时对蚊虫具有毒杀、驱避、拒食及影响生长发育的活性。为了深入研究艾蒿挥发油及其化学成分防治蚊虫的作用,提高在防治蚊虫产品上的开发利用,通过查阅近二十多年来国内外文献,综述了植物源挥发油防治蚊虫的作用方式及已有的相关剂型,同时对艾蒿挥发油的提取方式、防治蚊虫作用及有效活性成分进行了归纳总结,重点整理汇总了艾蒿挥发油类单体有效活性成分的作用方式及目标对象。基于目前艾蒿挥发油在防治蚊虫方面的研究,分析存在的问题,为其作为绿色植物材料研发的植物源杀虫剂、环境友好型农药、新型驱杀剂的合成和应用研究提供参考,并对新型高活性艾蒿源蚊虫防治产品的发展前景进行展望。

[关键词] 艾蒿;挥发油;活性成分;防治蚊虫

[中图分类号] R284.2;R289;R22;R2-031 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-9903(2020)15-0214-10

[doi] 10.13422/j.cnki.syfjx.20201616

[网络出版地址] <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3495.R.20200608.1722.005.html>

[网络出版日期] 2020-6-9 09:31

Research Progress on Mosquitoes Control by Essential Oil of *Artemisia argyi*

ZHONG Xiao-fei, ZHANG Hua*

(College of Pharmaceutical Science, Shandong University of Traditional Chinese Medicine,
Ji'nan 250000, China)

[Abstract] *Artemisia argyi* is a perennial aromatic herb. As been recorded in 2015 edition of *Chinese Pharmacopoeia*, it has the characteristics of warming meridian to stop bleeding, dispersing cold and relieving pain, and clearing dampness to stop itching in topical use. It contains a variety of active ingredients and has a wide range of edible and medicinal values. It mainly includes essential oil, flavonoids, polysaccharides, tannins and other compounds. The essential oil compounds have antioxidant, anti-inflammatory, anti-tumor and bacteriostatic biological activities. At the same time, they have activities of poisoning, repelling, antifeeding and affecting growth and development for the mosquitoes. In order to further study the activity of essential oil and its chemical components from *A. argyi* in mosquitoes control, and to improve the development and utilization of mosquito control products, we reviewed the functions of plant essential oil for mosquito control and the existing related dosage forms in this study. Simultaneously, we summarized the extraction methods, mosquito control functions and active ingredients of essential oil, with focus on the action mode and target objects of the active components in volatile oil monomers from *A. argyi*. Based on the current researches on essential oil of *A. argyi* in mosquitoes control, the existing problems were analyzed to provide references for the synthesis and application of plant insecticides, environment-friendly pesticides and new insecticides developed as green plant materials,

[收稿日期] 20191024(013)

[基金项目] 山东省重点研发计划项目(2017YYSP030);教育部“蓝火计划”(惠州)产学研联合创新项目(CXZJHZ201740)

[第一作者] 钟肖飞,在读硕士,从事中药新剂型与新技术研究,E-mail:17862987291@163.com

[通信作者] *张华,博士,副教授,从事中药新剂型与新技术研究,E-mail:zhongyiyao77@126.com

and put forward the prospects on the development of new highly active *A. argyi* mosquitoes control products.

[Key words] *Artemisia argyi*; essential oil; active ingredients; control insect pests and mosquitoes

在蚊媒、虫媒传染疾病的防治领域,现有的控制手段对生态环境及非目标生物(如人类)存在的负面影响来越受到重视,如普遍使用的广谱性驱避剂避蚊胺-DEET(*N,N*-二乙基间甲苯甲酰胺),研究表明其具有严重神经毒性,还可能引起皮炎、过敏反应、癫痫和心血管毒性等^[1-3]。化学合成杀蚊剂、杀虫剂的长期大量使用,及蚊虫持续进化导致驱杀效果逐渐下降^[4]。科学界有必要制定新型控制策略,以阻止目标耐药性迅速发展,并减轻对自然环境的不良影响^[5]。众所周知,自然界植物进化出防御机制免受外界侵害^[6],而这些天然产物对哺乳动物毒性有限。因此,可以利用植物次生代谢产物来对抗传播疾病的蚊虫^[7]。根据已有资料显示多种植物对蚊虫具有杀灭、驱避、拒食、抑制生长繁殖的潜力,主要包括除虫菊、艾蒿、大蒜、胡椒、桉、薄荷等菊科、楝科和唇形科植物^[8]。

作为天然防治蚊虫资源,艾蒿具有长久使用的历史。古罗马文献中有关于使用艾蒿预防蚊子、跳蚤叮咬的记录^[9-10]。中国古代南朝《荆楚岁记》曾记载:“端午采艾,悬门户上,以禳毒气”,民间端午节具有“门窗插艾”的习俗,还会将艾蒿点燃作烟熏治疗皮肤瘙痒或起到杀虫灭毒的作用^[11]。艾蒿属于菊科蒿属植物,多年生芳香草本,主要分布于中国、蒙古、朝鲜、俄罗斯(远东地区)等^[12],化学成分复杂多样,主要含有挥发油类、萜类、黄酮类、多糖类等^[13],其中挥发油类是主要活性成分,其包括醇类、单萜类、倍半萜类及其衍生物等多种成分,多种成分使其不仅具有杀毒抑菌、免疫调节等作用,还具有防治蚊虫的活性^[14]。艾蒿挥发油相对于化学合成剂,有着天然环保、价格低廉、资源丰富、无毒易降解、不易产生抗药性的优势,将其应用于防治蚊虫领域上将有广阔的发展前景,对挥发油中的活性成分进行筛选和结构改造也将是未来制备新型高性能防治蚊虫类产品的主要研究方向。笔者回顾了近十多年国内外在植物挥发油对蚊虫的作用方式、防治蚊虫相关剂型、及艾蒿挥发油在防治蚊虫方面的研究进展,通过归纳挥发油成分对不同防治对象的不同作用方式,筛选并总结出艾蒿挥发油中具防治蚊虫潜力的有效活性成分。针对目前艾蒿挥发油研发现状分析了其存在的问题,为植物源杀虫剂、环境友好型农药、新型驱杀剂的合成和应用

研究提供参考。

1 植物挥发油防治蚊虫的作用方式

植物挥发油具有资源丰富、安全无毒、绿色环保等特性,对蚊虫表现出良好生物活性,同时针对不同目标对象其表现出不同作用方式,主要包括对蚊虫不同程度的驱避、毒杀、拒食及影响生长发育等^[15]。

1.1 驱避 宿主本身的气味(如乳酸,1-辛烯-3-醇),二氧化碳及热量引诱刺激蚊虫,形成蚊虫趋向行为。在以上吸引因素中,气味对蚊虫趋向行为影响最大,因此驱避行为的产生主要与蚊虫嗅觉感知机制有关。据文献报道植物挥发油作用于蚊虫触角嗅觉感受器上的受体神经细胞,细胞上的嗅觉受体(ORx),嗅觉共受体(Orco)与挥发油分子结合后,抑制宿主气味引发的ORx介导电流,降低蚊虫对宿主的趋向性,从而诱导蚊虫驱避行为^[16-17]。另外,驱避剂也通过干扰蚊虫的瞬时受体电位(TRP)通道,来影响蚊虫的嗅觉系统,诱导蚊虫驱避行为^[18]。

迄今为止,植物挥发油对蚊虫的驱避作用始终是研究防治蚊虫植物挥发油的核心内容。蚊虫嗅觉感受器判断味源位置从而寻找寄主,利用这一点,可选取适当植物挥发油测试其对一种或多种害虫的驱避作用,结合蚊虫生活习性来运用到实际生产中,同时为防治蚊虫提供参考依据。现阶段国内外研究重点主要放在不同种类植物挥发油对多种蚊虫的活性上,付臣臣等^[19]开展了冬青油、艾蒿油、薄荷油、桉叶油和蓝桉油对淡色库蚊的活性筛选,半数击倒时间(KT₅₀)分别为16.91, 21.20, 22.57, 18.43, 19.48 min,因此都具有强熏蒸击倒毒性。刘辉等^[20]对香茅油、艾蒿油、丁香油、蓝桉油、薄荷油、百里香油、肉桂油、荆芥油、桉叶油在10 min内对白纹伊蚊的驱避率进行了检测,得出最大驱避率分别为48.4%, 65.9%, 34.0%, 71.6%, 74.9%, 65.7%, 87.5%, 98.0%, 72.5%,其中荆芥油、肉桂油、薄荷油具有毒杀蚊卵、幼虫及成虫、抑制妊娠雌蚊产卵等活性。KAMSUK等^[21]从花椒中提取挥发油,在实验室和野外不同环境条件下比较了其对接蚊、伊蚊和库蚊的驱避效果,在实验室中对3种蚊虫驱避效果弱于DEET,在野外二者的驱避效果相当,且对接蚊的驱避时间还长于避蚊胺-DEET,其挥发油对多种蚊虫有广谱驱避活性。

1.2 毒杀 挥发油对蚊虫的毒杀作用主要是干扰蚊虫神经系统,主要通过抑制乙酰胆碱酶(AChE),拮抗蚊虫体内离子型 γ -氨基丁酸(GABA)受体、作用于蚊虫体内章鱼胺(OA)受体等。AChE催化神经递质乙酰胆碱(ACh)水解,AChE被抑制后水解突触中ACh过多积累,虫体神经元过度刺激,肌肉快速抽搐、痉挛,引起蚊虫死亡^[22-23]。离子型GABA受体属于配体门控氯离子通道,挥发油拮抗GABA受体作用于虫体细胞离子孔道,阻滞氯离子内流,降低细胞超极化,减弱对神经传导的抑制作用,最终导致蚊虫神经兴奋无法抑制而死亡^[24]。无脊椎动物神经组织中OA可作为神经递质、神经激素或神经调节剂,调节蚊虫的取食、迁飞、求偶、产卵等生理行为。

毒杀作用是研究防治蚊虫植物挥发油的另一核心内容。多年来研究人员相继发现多种植物挥发油对蚊虫具有毒杀作用,其中主要集中在对幼虫的毒杀作用,在实际生产中,具有高效毒杀力的植物挥发油可以运用到蚊虫防治中。HUANG等^[25]研究了分别从到手香、科西嘉薄荷、白背蔓荆、芙蓉菊提取的挥发油对埃及伊蚊、白纹伊蚊和致倦库蚊的杀幼虫性,在12 h和24 h处理时间下半数致死浓度(LC₅₀)都小于100 mg·L⁻¹,其中到手香挥发油具最高杀幼虫活性,对2种伊蚊的LC₅₀分别为42.9, 64.15 mg·L⁻¹。SCALVENZI等^[26]通过24 h体外试验分别检测了罗勒、奥寇梯木、钩状胡椒3种植物挥发油对埃及伊蚊的致死率,结果平均致死率分别为2.2%~100.0%,2.9%~100.0%,2.7%~100.0%,LC₅₀分别为69.3,75.5,25.7 ppm。

1.3 拒食及影响生长发育 相较于驱避、毒杀的作用方式,对于蚊虫拒食和影响生长发育的研究存在一定空白。挥发油对蚊虫的拒食作用主要通过作用于蚊虫触角感受器、下颚须或下唇须的感觉器,使得外周神经系统发生变化,干扰食物特性转化为电信号传入中枢神经系统的生理过程^[27]。挥发油还对蚊虫的生长发育产生影响,主要包括产卵率和孵化率下降、死卵、畸形幼虫、成虫率降低及发育期延长等问题^[27]。

2 植物挥发油防治蚊虫相关剂型的研究现状

植物挥发油不但具有良好防治蚊虫活性,还具有易降解、低残留、毒性低、不易产生抗药性等优点,符合人们对卫生杀虫剂安全、环保的要求,具有开发成为卫生蚊虫防控剂的潜力和广阔的应用前景。植物挥发油性不稳定、易分解变质、散失挥

发等问题,且原油存在油腻、灼热等缺点。植物挥发油一般经过一定加工过程转变成不同的应用形态更能发挥其作用,不同的应用形态可以针对不同防治对象、不同环境和不同方法。沈睿娟等^[28]对川芎、姜黄、羌活、蛇床子、桉叶、薄荷6种植物挥发油优化复方配方,制备高效安全植物源喷雾剂,其对白纹伊蚊的有效保护时间大于6 h。为了增加作用时间、加强防治效果,以及考虑到方便携带和使用等因素,近年来研究人员将缓释技术运用到剂型研发上,达到长效防治蚊虫效果。WU等^[29]选用荆芥挥发油为囊心、明胶和阿拉伯胶(1:1)为囊材,制备挥发油微囊,再结合缓释介质白凡士林、羊毛脂、聚乙二醇制备微胶囊软膏制剂,从而对白纹伊蚊有效保护时间延长到4~5 h。王莉等^[30]在研究中采用缓释技术,使得芳樟油、香叶油、天竺葵油与缓释剂相结合制得酊剂、膏剂,在实验室中检验了酊剂、膏剂对白纹伊蚊、中华按蚊、淡色库蚊的驱避效果,结果表明含有缓释剂的酊剂、膏剂的驱避作用时间明显大于挥发油原药,其中膏剂对中华按蚊、淡色库蚊的有效保护率大于10% DEET,从数据结果得出植物挥发油与缓释技术相结合,能够有效延长其起效的作用时间。

现阶段利用植物挥发油研发防治蚊虫的普通剂型主要包括乳油、酊剂、膏霜、喷雾剂、气雾剂、驱蚊液、驱蚊露、驱蚊湿巾、驱蚊香皂、驱蚊贴等,新兴制剂加工技术是缓释剂,如高分子聚合物、环糊精包埋、微胶囊、脂质体等,其在较低含量或浓度下,效果明显高于普通制剂。因此将具防治蚊虫活性的植物挥发油开发成合适剂型对其使用、发挥作用和推广十分必要。

3 艾蒿挥发油对蚊虫的防治作用

在燃烧艾蒿驱蚊虫的基础上,发现艾蒿挥发油对家蝇、果蝇及菜青虫等有明显拒食、毒杀作用^[31]。现阶段对于艾蒿挥发油防治蚊虫的研究不只是停留在现象层面,更多研究者们以艾蒿挥发油有效活性成分及蚊虫的生理变化为中心进行探索。王佳璐^[32]同时在动物水平和细胞水平上开展了艾蒿挥发油对白纹伊蚊活性及卵黄变化的实验,发现艾蒿精油对白纹伊蚊成虫和幼虫的半数致死量(LD₅₀)分别为67.6,45.4 mg·L⁻¹,经处理后妊娠雌蚊卵母细胞中存在较大颗粒的脂滴、卵黄物质沉积及卵黄膜形成延迟、卵壳不成形的现象,从而降低产卵率;同时艾蒿挥发油良好防治蚊虫的作用使其对赤拟谷盗、玉米象的LD₅₀分别为24.1,39.8 mg·L⁻¹。因燃烧

艾蒿产生的烟雾有镇静、消毒、驱虫等效果,刘美凤等^[33]通过采用GC-MS分别分析艾蒿挥发油和艾蒿的化学成分来进行了筛选共同驱避活性成分的研究,结果表明1,8-桉叶油素、龙脑、樟脑、侧柏酮、石竹烯等是两者共同成分,其中1,8-桉叶油素和 β -石竹烯是驱避蚊虫有效成分。

相较于目前市场上常用防治蚊虫的化学合成剂(如KBR3023, IR3535和DEET),艾蒿挥发油对人体和环境不构成危害,是一种具有潜在开发前景的植物资源,为了充分利用艾蒿挥发油资源来转化成植物源产品,研究应以区分活性成份为重点,进一步分析、筛选、优化艾蒿挥发油中的天然有效活性成分,从而为研制高效植物源防治蚊虫类产品提供参考。

3.1 艾蒿挥发油防治蚊虫活性成分的提取工艺

从芳香植物中提取挥发油常用经典萃取方法为固-液有机溶剂萃取法,其对挥发油具有良好回收能力,但存在着对人体、环境潜在毒性的缺陷;与固-液有机溶剂萃取法相比,水蒸气蒸馏法更易操作、且无环境污染^[34]。刘红杰等^[35]分别利用水蒸气蒸馏法、超临界CO₂萃取法、超声波提取法和微波提取法制备艾蒿挥发油的收率分别为1.02%, 2.46%, 3.17%, 3.32%,挥发油成分分别鉴定出80, 56, 45, 78个化合物。李静等^[36]以艾蒿挥发油收率和桉油精含量为考察指标比较了水蒸气蒸馏法和超临界CO₂萃取法提取的效果,试验得出后者收率明显大于前者,但桉油精含量结果相近。王小生等^[37]采用超临界CO₂萃取法提取艾蒿挥发油,收率高、纯度高且无有机溶剂残留,操作简单,收率为1.443%,桉油精质量分数为0.318 mg·g⁻¹,提高了挥发油收率与质量。

艾蒿挥发油化学成分较复杂,且各提取法所得的防治蚊虫有效活性成分差异较大,因此应综合考虑有效成分含量、挥发油收率及相应提取操作设备等因素,结合实际情况来筛选最佳提取工艺保证最大限度的提高有效活性成分含量。

3.2 艾蒿挥发油中防治蚊虫的成分及其作用 艾蒿不同产地、采集时间、炮制方法、存放时间及提取工艺差异性会影响挥发油类化合物种类及含量,也造成防治蚊虫活性成分的种类及含量的不同^[38]。艾蒿挥发油主要包括1,8-桉叶油素、樟脑,3-萜烯, β -蒎烯, α -蒎烯,龙脑,石竹烯等单萜类、倍半萜类及其衍生物成分^[39-41]。单萜类、倍半萜类成分对蚊虫表现出拒食、驱避、毒杀、影响生长发育等活性,其中单萜类的起效时间在16~30 min,持久度较低,而

倍半萜类起效稳定且效果持久^[42]。基于艾蒿挥发油良好防治蚊虫活性的原理,探讨总结了艾蒿挥发油中单萜类、倍半萜类及其衍生物成分中具有防治蚊虫活性的单体成分,具体活性成分、防治蚊虫对象及作用方式见以下内容。

3.2.1 β -石竹烯 β -石竹烯是天然双环倍半萜类,存在于多种植物挥发油中^[43]。JAENSON等^[44]研究了瑞典和几内亚比绍驱蚊植物提取物和挥发油对埃及伊蚊的活性,采用固相萃取法分析挥发性成分,并将挥发油性成分进行驱杀蚊虫试验,得出活性成分主要包括 β -石竹烯、蒎烯、柠檬烯等。 β -石竹烯驱逐污浊环境中孑孓、蚊蝇、家蝇等目标,经过臭氧还原得到的石竹烯氧化物同样具有驱避蚊虫作用,且驱逐目标不仅限于双翅目昆虫^[45]。PARK等^[46]提取百里香中 β -石竹烯成分进行驱蚊实验,其对目标白纹伊蚊具有18%驱逐率。因 β -石竹烯作用目标不止双翅目昆虫,研究者们采用象鼻虫(鞘翅目昆虫)作为目标对象,观察 β -石竹烯的作用方式及效果,WHEELER等^[47]报道当 β -石竹烯浓度接近象鼻虫幼虫分泌物浓度(3.5, 35 mg·g⁻¹)时,明显改变红火蚁趋向行为。在红火蚁探视实验中,将 β -石竹烯分成35, 3.5, 0.35 mg·L⁻¹ 3个浓度,高浓度在整个观察期(3个观察期分别为15 min, 3, 6 h)明显使得红火蚁趋向性下降,中浓度只对前两个观察期有效,低浓度则无效,因此 β -石竹烯抑制趋向性的起效时间与含量呈线性关系。

为了研究 β -石竹烯对蚊虫的生理影响,通过触角电位检测器检测出 β -石竹烯对蚊虫触角去极化,影响触角探测功能,干扰妊娠雌蚊通过气味寻找合适产卵地,从而阻碍产卵行为,降低成虫率;同时发现蚊虫触角嗅觉神经元SBT-I-B对 β -石竹烯反应敏感, β -石竹烯干扰蚊虫通过气味来寻找宿主的生理活动^[48]。棉蚜经 β -石竹烯处理后排蜜频率和蜜滴重量减小,平均繁殖力降低, β -石竹烯抑制棉蚜体内AChE,多酚氧化酶,羧酸酯酶及谷胱甘肽-S-转移酶(昆虫体内重要代谢解毒酶系)^[22-23]。因此 β -石竹烯通过影响蚊虫神经系统、生殖系统、内分泌系统起到驱避、毒杀、抑制产卵等作用。

3.2.2 柠檬烯 柠檬烯是自然界中常见萜烯类化合物之一,常见于清洁产品及驱避杀虫等产品配方,属于低毒性物质,已被注册为杀虫剂产品活性成分,主要用于控制跳蚤和蜚虫等^[49-51]。GILLIJ等^[52]从两种挥发油对埃及伊蚊的驱避实验中评价了两者共同成分柠檬烯的活性,两种挥发油柠檬烯

质量分数分别为19.7%, 10.1%, 驱避埃及伊蚊起效时间分别为90, 50 min, 证明柠檬烯促进挥发油驱避埃及伊蚊作用。

因挥发油本身成分复杂, 只从含有柠檬烯成分的挥发油对蚊虫活性作用实验中推测柠檬烯活性缺少信服力, 因此研究重点被放在单体柠檬烯对蚊虫活性作用上。KAPSASKI-KANELLI等^[53]从杀幼虫性和驱避性2种生物检定实验评价柠檬烯对蚊虫活性, 发现柠檬烯降低50%蚊虫着陆率, 表现出强驱避性。CHENG等^[54]开展了柠檬烯对埃及伊蚊、白纹伊蚊的四龄幼虫毒杀活性实验, 在24 h内其 LC_{50} 分别为18.1, 32.7 $mg \cdot L^{-1}$ 。蚊卵经柠檬烯接触处理后, 孵化幼虫肢体残缺, 出现一条或多条腿黏附在卵上、只孵化出头部和胸部、羽化后虫体翅膀皱缩、缺失部分身体部位等畸形幼虫, 原因是柠檬烯作用于虫体中IGR(昆虫生长调节剂类性质), 对蚊卵和成虫有潜在生长调节作用, 其延迟毒性致虫体发育异常^[55]。

3.2.3 1,8-桉叶油素 相关报道1,8-桉叶油素含量高的精油对埃及伊蚊、淡色库蚊都有一定驱避作用, 但驱避时间都小于30 min^[56]。为充分了解单体1,8-桉叶油素对蚊虫的活性, 研究者们从驱避性、毒杀性、摄食及产卵等方面对其进行了评价。ALVAREZ等^[57]研究得出1,8-桉叶油素对埃及伊蚊、白纹伊蚊驱避有效时间分别为(5.00±2.89), (12.50±2.50) min。KLOCKE等^[58]从妊娠雌蚊取食和产卵行为方面评价了1,8-桉叶油素活性, 实验采用1 000只饥饿雌蚊, 分别置于含有10% 1,8-桉叶油素的实验组和对照组中, 30 min后进食雌蚊平均数分别为27, 55, 且实验组进食雌蚊在16 min后被击倒; 含有0.2% 1,8-桉叶油素的实验培养皿平均产卵量为24 mg, 而对照组平均为55 mg; 含有1% 1,8-桉叶油素实验培养皿妊娠雌虫在24~36 h内无产卵行为, 结果表明1,8-桉叶油素存在明显抑制妊娠雌蚊行为(进食和产卵)的作用。

1,8-桉叶油素对蚊虫有较高活性, 同时毒副作用小、不易产生抗药性及无二次污染等特点使其成为极具潜力的防治蚊虫有效成分。因此在1,8-桉叶油素影响蚊虫行为基础上, FAHMY等^[59]进一步开展经1,8-桉叶油素处理后蚊幼虫生理变化的实验, 研究发现1,8-桉叶油素具有强“疏水性”, 蚊幼虫主要生活在水栖环境中, 1,8-桉叶油素在幼虫疏水表皮蜡层和水之间进行分配, 强疏水性使其易于穿透幼虫的疏水性角质层起到毒杀效果。

3.2.4 蒎烯 蒎烯有 α -和 β -蒎烯2种异构体, 二者均存在于多种天然精油中。SAKHANOKHO等^[60]对菊苣挥发油成分进行驱避蚊虫活性筛选, 发现挥发油中单体 β -蒎烯驱逐埃及伊蚊的最小有效剂量MED为 $0.140 \pm 0.047 mg \cdot cm^{-2}$, 其促进挥发油发挥驱避作用。为充分了解单体蒎烯对蚊虫活性, 研究者们开展一系列研究。GIATROPOULOS等^[55]通过杀幼虫活性实验验证 β -蒎烯对白纹伊蚊幼虫存在较强毒性作用, 其 LC_{50} 为42.39~47.33 $mg \cdot L^{-1}$, α -蒎烯毒性小于 β -蒎烯, 其 LC_{50} 在68.68~78.30 $mg \cdot L^{-1}$; 成虫驱逐检测实验中, 观察时间内经(+)- β -蒎烯和(-)- β -蒎烯处理的实验组白纹伊蚊成虫平均着陆次数分别为0.6, 13, 明显小于对照组29.1。LIU等^[61]研究了致倦库蚊触角感受器对驱避剂的生理反应, 试验中采用单感记录器进行记录, 得出 α -蒎烯以剂量依赖方式刺激嗅觉感受器神经元, β -蒎烯干扰ORNs上的电信号传输, 致使触角神经元放电率异常, 干扰触角嗅探气味的功能, 影响蚊子寻找宿主行为。蒎烯主要作用于蚊科中的伊蚊属、库蚊属, 活性主要包括驱避、毒杀, 因此可以充分利用蒎烯这一特性, 研发防治节肢蚊虫的高度目标性产品。

3.2.5 艾蒿挥发油中其他活性成分 多年来国内外学者不断筛选萜类植物源防治蚊虫活性成分, 艾蒿挥发油中含有多种具有防治蚊虫的有效单萜类成分。TAK等^[62]选用20种单萜类化合物检测对棉红蜘蛛的驱避活性, 驱避率达到90%以上的包括香芹酚、樟脑、龙脑、 α -松油醇。CHENG等^[63]在通过研究不同年限的柳杉挥发油及化学成分的杀蚊虫活性, 发现3-萜烯, 异松油烯, α -萜烯, α -蒎烯对埃及伊蚊的 LC_{50} 分别为25.3, 26.8, 28.1, 79.1 $mg \cdot L^{-1}$, 对白纹伊蚊幼虫的 LC_{50} 分别为27.0, 22.8, 22.4, 74.0 $mg \cdot L^{-1}$ 。ESSAM^[64]测定了丁香酚、 α -松油醇对美洲蟑螂、木蚁、德国小蠊的毒杀作用, 经处理的美国蟑螂由极度活跃, 到腿部、腹部痉挛之后击倒死亡, 木蚁和美国蟑螂则直接击倒死亡, 其机制是丁香酚、 α -松油醇作用于虫体OA受体。PARK等^[65]对尖音库蚊进行驱避试验, 选择从百里香挥发油中分离的香芹酚、芳樟醇、麝香草酚、对伞花烃对和 α -萜烯, 研究表明对伞花烃, 香芹酚, α -松油烯的驱避效果强于DEET, 对库蚊有良好活性。

艾蒿挥发油中不仅含有多种单萜类有效活性成分, 同时含有倍半萜类成分。PLATA-RUEDA等^[66]从肉桂和丁香挥发油中分离出单萜类成分, 对粮仓象鼻虫开展了毒杀、驱避试验, 其中丁香酚, 石

竹烯氧化物, α -蒎烯, 蛇麻烯, 水芹烯的 LC_{50} 分别为 2.76, 2.78, 4.23, 4.61, 5.16 $mL \cdot L^{-1}$ 。徐士超等^[67]报道了 α -柠檬烯, β -柠檬烯, 侧柏酮, 1,8-桉叶素, 4-松油醇等是具触杀活性的挥发油萜类成分, 其中 α -松油醇, β -石竹烯及 4-松油醇对马铃薯叶甲虫有拒食作用, 同时 4-松油醇对金龟科昆虫、柏松脂象甲虫、蝉、鞘翅和叩头虫也有拒食作用, 柠檬烯、侧柏酮对谷蠹、长角扁谷盗、米象虫等害虫有很高的毒杀活性, 乙酸龙脑酯、水芹烯对玉米象和绿豆象成虫有触杀活性。

单萜类成分柠檬烯, 樟脑, 1,8-桉叶油素, 3-蒎烯, β -蒎烯, α -蒎烯, 龙脑, 侧柏酮, α -松油醇, 水芹烯, 乙酸龙脑酯, 丁香酚, α -萜烯, 香芹酚, 4-松油醇, 异松油烯, 对伞花烃, 倍半萜类石竹烯、氧化石竹烯、蛇麻烯对不同类型的蚊虫具有良好的生物活性, 艾蒿挥发油含有以上活性成分, 侧面证实了艾蒿挥发油防治蚊虫的能力与上述活性成分有关, 对艾蒿挥发油中活性成分驱蚊目标及驱避方式进行汇总见表 1。

表 1 艾蒿挥发油中防治蚊虫活性成分

Table1 Active ingredients for insect pests and mosquitoes control in essential oil of *Artemisia argyi*

分类	化合物名称	防治对象	作用方式	参考文献
倍半萜类成分	β -石竹烯 β -caryophyllene	孑孓、蚊蝇、家蝇、白纹伊蚊、埃及伊蚊、象鼻虫、红火蚁、致倦库蚊、棉蚜虫、马铃薯叶甲虫	毒杀、驱避、拒食、抑制产卵	[22-23,45-48,67]
	氧化石竹烯 caryophyllene oxide	孑孓、蚊蝇、家蝇、象鼻虫	毒杀、驱避	[45,66]
	蛇麻烯 humulene	象鼻虫	毒杀	[66]
单萜类成分	柠檬烯 cinene	跳蚤、蝉虫、埃及伊蚊、白纹伊蚊、谷蠹、长角扁谷盗、米象虫	毒杀、驱避、影响生长发育	[49-55,67]
	1,8-桉叶油素 1,8-cineole	埃及伊蚊、淡色库蚊、白纹伊蚊	毒杀、驱避、拒食、抑制产卵	[56-59]
	β -蒎烯 β -pinene	埃及伊蚊、致倦库蚊、白纹伊蚊	毒杀、驱避、拒食	[55,60-61]
	α -蒎烯 α -pinene	埃及伊蚊、致倦库蚊、白纹伊蚊、象鼻虫	毒杀、驱避、拒食	[55,61,63,66]
	香芹酚 carvacrol	棉红蜘蛛、尖音库蚊	驱避	[62,65]
	樟脑 camphor	棉红蜘蛛	驱避	[62]
	龙脑 borneol	棉红蜘蛛	驱避	[62]
	α -松油醇 α -terpineol	棉红蜘蛛、美洲蟑螂、木蚁、德国小蠊、马铃薯叶甲虫	毒杀、驱避	[62,64,67]
	3-蒎烯 3-carene	埃及伊蚊、白纹伊蚊	毒杀	[63]
	异松油烯 terpinolene	埃及伊蚊、白纹伊蚊	毒杀	[63]
	α -萜烯 α -terpinene	埃及伊蚊、白纹伊蚊、尖音库蚊	毒杀	[63,65]
	丁香酚 eugenol	美洲蟑螂、木蚁、德国小蠊、象鼻虫	毒杀、驱避	[64,66]
	对伞花烃 <i>p</i> -cymene	尖音库蚊	驱避	[65]
	水芹烯 1,3-cyclohexadiene	象鼻虫、玉米象、绿豆象	毒杀	[66-67]
	侧柏酮 thujone	谷蠹、长扁谷盗虫、米象虫	毒杀	[67]
	4-松油醇 1-4-terpineol	马铃薯叶甲虫、金龟科昆虫、柏松脂象甲虫、蝉、鞘翅、叩头虫	毒杀、拒食	[67]
	乙酸龙脑酯 bornyl acetate	玉米象、绿豆象	毒杀	[67]

4 艾蒿挥发油防治蚊虫的产品应用

根据艾蒿挥发油防治蚊虫的特性, 市面上出现了很多添加艾蒿挥发油的乳霜剂、喷雾剂、气雾剂、粉剂、贴剂等, 其中常见的霜剂有药膏、驱蚊乳液等, 喷雾剂及气雾剂常通过将艾蒿挥发油与其他驱蚊物质进行复配形成花露水、杀虫喷雾、杀蚊喷雾, 粉剂则是驱蚊爽身粉、驱蚊杀虫药粉等, 贴剂有驱蚊贴、驱虫贴等。除此之外, 艾蒿挥发油活性物质

通过浓缩制备后经溶解或点燃的方式释放出来, 例如蚊香、蝇香等, 此类产品使用方便快捷, 驱避效果明显, 受到消费者的广泛接受, 因此在消费市场上占据重要地位^[68]。现阶段, 为了使艾蒿挥发油防治蚊虫功能得以稳定发挥且不受空间、温度等各方面条件所局限, 研究人员利用已有的微胶囊制剂技术将挥发油与纺织品纤维结合, 在纤维表面形成不溶于水和一般有机溶剂的防驱蚊药膜, 得到经久耐

用的防蚊虫纺织品^[69-72]。

5 植物源艾蒿挥发油防治蚊虫剂存在的问题

艾蒿挥发油是艾蒿次生代谢产物,不同的地域分布、生长环境、生长周期等会造成其含量和生物活性物质的不同,从而增加了研发难度。其次现阶段研究重点主要是艾叶,对艾蒿全株各部位成分特点掌握不全面,尤其是针对根、茎的研究报道还比较少。最后,关于艾蒿挥发油及其成分在防治蚊虫方面的相关文献较少,尚不清楚防治成分及相对应的具体蚊虫目标,以及防治蚊虫效果的产生是由某种活性成分还是多种活性成分协同作用,研究深度远远不够;对于修饰活性成分分子团的相关研究不够深入,如活性成分如何加以修饰以及如何通过修饰后加强防治蚊虫效果;艾蒿挥发油具有无药物残留、易降解、无环境污染、气味清新等优点,但稳定性、高效性、持久性方面低于化学合成剂,尤其是低于DEET;现有市面上大都是直接将艾蒿挥发油当作辅助材料添加到各类产品中,因此能够稳定发挥效果的产品种类有限。

市场上以植物源为噱头的产品鱼龙混杂,一些生产厂家私自添加化学农药成分却打着植物源的幌子,使得假冒劣质产品流入消费市场。植物源产品的发展面临着技术滞后、产业发展集中落后、技术水平落后等诸多负面因素,且现有的产品品种单一、剂型较少、很难适应高需求的消费市场。

6 展望

在寻找具有防治蚊虫活性天然成分过程中,植物源化学成分是很好的候选。市面上已有艾蒿类产品,大都添加挥发油制得,因挥发油本身是粗提物直接运用来开发相关产品,会大幅度降低其利用率,造成资源浪费。因此相关研究可以提取有效活性成分,探究活性成分的固有比例;对活性成分进行加工修饰,如在不改变其天然碳骨架结构的基础上引入或替换个别基团,从而研发高效持久、选择性高的植物源杀虫剂、环境友好型农药、新型驱避剂等。

随着人类对安全性和环境相容性要求的提高,天然无害产品正在受到追捧,因此应用艾蒿挥发油来研发防治蚊虫的产品保持着绿色环保产品特性,必将受到消费者青睐。使用天然植物活性物质代替化学合成剂不仅减少了环境污染,而且提高了使用安全性、长期稳定性及经济效益的发展,协调环境可持续发展目标是未来防治蚊虫原料的最佳选择。现阶段把植物资源转化成产品服务于消费市

场,需要涉及到多个方面的因素,如植物资源保护、生态环境影响、商业化可行性、社会效益等都需要慎重考虑,任何一方面因素出现问题都会影响产品的开发进度,最终可能会导致产品研发中断。研发植物源艾蒿挥发油防治蚊虫的产品,需进一步筛选有效活性成分,明确靶标生物,对其进行积极创新优化,扩大应用深度,最终优化最佳产品推向消费市场。

【参考文献】

- [1] COOPER L, KANG S Y, BISANZIO D, et al. Pareto rules for malaria super-spreaders and super-spreading [J]. Nat Commun, 2019, 10(1):3939.
- [2] PREUB A, PFITZNER M. Mosquito larvae control by photodynamic inactivation of their intestinal flora—a proof of principal study on *Chaoborus* sp [J]. Photochem Photobiol Sci, 2019, 18(10):2374-2380.
- [3] SATYAL P, HIEU H V, CHUONG N T H, et al. Chemical composition, aedes mosquito larvicidal activity, and repellent activity against *Triatoma rubrofasciata* of *Severinia monophylla* leaf essential oil [J]. Parasitol Res, 2019, 118(3):733-742.
- [4] NAQQASH M N, GOKCE A, BAKHSH A. Insecticide resistance and its molecular basis in urban insect pests [J]. Parasitol Res, 2016, 115(4):1363-1373.
- [5] SELVARAJ P, SURESH J, WENGER E A, et al. Reducing malaria burden and accelerating elimination with long-lasting systemic insecticides: a modelling study of three potential use cases [J]. Malar J, 2019, 18(1):307.
- [6] HANAN A, BASIT A, NAZIR T, et al. Anti-insect activity of a partially purified protein derived from the entomopathogenic fungus *Lecanicillium lecanii* (Zimmermann) and its putative role in a tomato defense mechanism against green peach aphid [J]. J Invertebr Pathol, 2019:107282.
- [7] SILVA W J, DORIA G A, MAIA R T, et al. Effects of essential oils on *Aedes aegypti* larvae: alternatives to environmentally safe insecticides [J]. Bioresour Technol, 2008, 99(8):3251-3255.
- [8] HAAR P J, BUNTIN G D, JACOBSON A, et al. Evaluation of tactics for management of sugarcane aphid (*Hemiptera: Aphididae*) in grain sorghum [J]. J Econ Entomol, 2019, 112(6):2719-2730.
- [9] GHAYEMPOUR S, Montazer M. Micro/nanoencapsulation of essential oils and fragrances: focus on perfumed, antimicrobial, mosquito-repellent

- and medical textiles [J]. *J Microencapsul*, 2016, 33 (6):497-510.
- [10] BARNARD D R, XUE R. Laboratory evaluation of mosquito repellents against *Aedes albopictus*, *Culex nigripalpus*, and *Ochlerotatus triseriatus* (Diptera: Culicidae)[J]. *J Med Entomol*, 2004, 41(4):726-730.
- [11] 郑婷婷,田瑞昌,刘国辉,等. 艾叶及其燃烧产物有效成分的研究进展[J]. *中华中医药杂志*, 2019, 34(1):241-244.
- [12] 李春娜,占颖,刘洋洋,等. 艾蒿药理作用和开发利用研究进展[J]. *中华中医药杂志*, 2014, 29(12):3889-3891.
- [13] 刘梦菲,江汉美,肖宇硕,等. HS-SPME-GC-MS联用技术分析不同产地艾叶挥发性成分[J]. *中国实验方剂学杂志*, 2018, 24(10):79-89.
- [14] 江德裕,丁维俊. 艾叶挥发油成分及其影响因素研究进展[J]. *云南中医中药杂志*, 2019, 40(3):80-83.
- [15] 董菲,田玉红,黄琼,等. 植物精油对害虫的驱避与毒杀活性的应用研究进展[J]. *农药*, 2018, 57(11):781-784,788.
- [16] 向婧洁,钟延强,樊莉,等. 蚊虫驱避剂新进展[J]. *中国媒介生物学及控制杂志*, 2013, 24(1):79-82.
- [17] DAVIS E E. A receptor sensitive to oviposition site attractants on the antennae of the mosquito, *Aedes aegypti*[J]. *J Insect Physiol*, 1976, 22(20):1371-1376.
- [18] 筱禾. 以昆虫瞬时受体电位(TRP)通道作为杀虫剂及驱避剂的靶标[J]. *世界农药*, 2017, 39(2):9-13.
- [19] 付臣臣,万涛,江志利,等. 41种植物精油对淡色库蚊的熏蒸活性[J]. *昆虫学报*, 2013, 56(7):779-785.
- [20] 刘辉,晏许超,李慧,等. 9种植物精油对白纹伊蚊驱避活性的研究[J]. *中华卫生杀虫药械*, 2015, 21(1):17-20.
- [21] KAMSUK K, CHOOCHOTE W, CHAITHONG U, et al. Effectiveness of *Zanthoxylum piperitum*-derived essential oil as an alternative repellent under laboratory and field applications[J]. *Parasitol Res*, 2007, 100(2):339-345.
- [22] 刘雨晴,薛明,张庆臣,等. 黄荆中 β -石竹烯对棉蚜的毒力和作用机理[J]. *昆虫学报*, 2010, 53(4):396-404.
- [23] DEMIRCI B, YUSUFOGLU H S, TABANCA N, et al. *Rhanterium epapposum* Oliv. essential oil: chemical composition and antimicrobial, insect-repellent and anticholinesterase activities[J]. *Saudi Pharm J*, 2017, 25(5):703-708.
- [24] 陈佳丽,翟纳,陈达,等. 亚氨基哒嗪类衍生物对人与昆虫GABA受体的选择性研究[J]. *武汉工程大学学报*, 2019, 41(1):12-18,24.
- [25] HUANG H T, LIN C C, KUO T C, et al. Phytochemical composition and larvicidal activity of essential oils from herbal plants[J]. *Planta*, 2019, 250 (1)59-68.
- [26] SCALVENZI L, RADICE M, TOMA L, et al. Larvicidal activity of *Ocimum campechianum*, *Ocotea quixos* and *Piper aduncum* essential oils against *Aedes aegypti*[J]. *Parasite*, 2019, 26:23.
- [27] 苏柳,钱文焱,国金昱,等. 植物精油防治害虫及作用机理研究进展[J]. *内蒙古林业科技*, 2018, 44(1):61-64.
- [28] 沈睿娟,毛羽,谭丰,等. TQ纯天然植物蚊虫驱避剂质量控制及药效学研究[J]. *中国媒介生物学及控制杂志*, 2016, 27(3):283-287.
- [29] WU H, FU C C, YU D D, et al. Repellent activity screening of 11 kinds of essential oils against *Aedes albopictus* Skuse: microcapsule preparation of Herba Schizonepetae oil and repellent bioassay on hand skin [J]. *Trans R Soc Trop Med Hyg*, 2013, 107(8):471-479.
- [30] 王莉,姜志宽,韩招久,等. 植物源蚊虫驱避剂的筛选研究[J]. *中华卫生杀虫药械*, 2016, 22(5):427-432.
- [31] 吴芳芳,何炎森,卢劲梅,等. 艾草驱避蚊虫研究进展[J]. *农学学报*, 2015, 5(9):96-99.
- [32] 王佳璐. 艾蒿精油对白纹伊蚊的作用及卵黄发生的影响[D]. 武汉:华中农业大学, 2009.
- [33] 刘美凤,周惠. 艾叶挥发油与燃烧烟雾的化学成分比较[J]. *华南理工大学学报:自然科学版*, 2012, 40 (1):30-34.
- [34] CUI Q, WANG L T, LIU J Z, et al. Rapid extraction of *Amomum tsao-ko* essential oil and determination of its chemical composition, antioxidant and antimicrobial activities[J]. *J Chromatogr B Analyt Technol Biomed Life Sci*, 2017, 1061-1062:364-371.
- [35] 刘红杰,白杨,洪燕龙,等. 不同提取方法制备的艾叶挥发油化学成分分析与急性肝毒性比较[J]. *中国中药杂志*, 2010, 35(11):1439-1446.
- [36] 李静,熊维政,李磊,等. 2种不同方法提取艾叶挥发油的效果比较[J]. *中国药房*, 2016, 27(28):3982-3984.
- [37] 王小生,熊维政,李静. CO₂超临界萃取法提取艾叶挥发油工艺研究[J]. *中医学报*, 2017, 32(9):1701-1704.
- [38] 许俊洁,卢金清,郭胜男,等. 不同部位与不同采收期蕲艾精油化学成分 GC-MS 分析[J]. *中国实验方剂学杂志*, 2015, 21(21):51-57.
- [39] 宋叶,张鹏云,戴卫波,等. 不同产地艾叶挥发油成分的比较研究[J]. *时珍国医国药*, 2019, 30(4):

- 845-851.
- [40] JUDZENTIENE A, TOMI F, CASANOVA J. Analysis of essential oils of *Artemisia absinthium* L from Lithuania by GC, GC(RI), GC-MS and ¹³C NMR[J]. Natural Product Communications, 2009, 4(8): 1113-1118.
- [41] REZAEINODEHI A, KHANGHOLI S. Chemical composition of the essential oil of *Artemisia absinthium* growing wild in Iran[J]. Pak J Biol Sci, 2008, 11(6): 946-949.
- [42] GLEISER R M, BONINO M A, ZYGADLO J A. Repellence of essential oils of aromatic plants growing in Argentina against *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae) [J]. Parasitol Res, 2011, 108(1): 69-78.
- [43] 刘晓宇, 陈旭冰, 陈光勇. β -石竹烯及其衍生物的生物活性与合成研究进展[J]. 林产化学与工业, 2012, 32(1): 104-110.
- [44] JAENSON T G, PALSSON K, BORG-KARLSON A. Evaluation of extracts and oils of mosquito (Diptera: Culicidae) repellent plants from Sweden and Guinea-Bissau[J]. J Med Entomol, 2006, 43(1): 113-119.
- [45] BENELLI G, PAVELA R, DRENAGGI E, et al. Insecticidal efficacy of the essential oil of *jambú* (*Acmella oleracea* (L.) R. K. Jansen) cultivated in central Italy against filariasis mosquito vectors, houseflies and moth pests[J]. J Ethnopharmacol, 2019, 229: 272-279.
- [46] PARK Y U, KOO H N, KIM G H. Chemical composition, larvicidal action, and adult repellency of *Thymus magnus* against *Aedes albopictus* [J]. J Am Mosq Control Assoc, 2012, 28(3): 192-198.
- [47] WHEELER G S, MASSEY L M, SOUTHWELL I A. Dietary influences on terpenoids sequestered by the biological control agent *Oxyops vitiosa*: effect of plant volatiles from different *Melaleuca quinquenervia* chemotypes and laboratory host species [J]. J Chem Ecol, 2003, 29(1): 189-208.
- [48] DA SILVA R C, MILET-PINHEIRO P, BEZERRA D A, SILVA P C, et al. (*E*)-Caryophyllene and α -humulene: *Aedes aegypti* oviposition deterrents elucidated by gas chromatography-electrophysiological assay of *Commiphora leptophloeos* leaf oil [J]. PLoS One, 2015, 10(12): e0144586.
- [49] HIROTA R, ROGER N N, NAKAMURA H, et al. Anti-inflammatory effects of limonene from yuzu (*Citrus junos* Tanaka) essential oil on eosinophils[J]. J Food Sci, 2010, 75(3): H87-92.
- [50] ROBERTO D, MICUCCI P, SEBASTIAN T, et al. Antioxidant activity of limonene on normal murine lymphocytes: relation to H₂O₂ modulation and cell proliferation[J]. Basic Clin Pharmacol Toxicol, 2010, 106(1): 38-44.
- [51] NIU X, HO S S, HO K F, et al. Indoor secondary organic aerosols formation from ozonolysis of monoterpene: an example of *d*-limonene with ammonia and potential impacts on pulmonary inflammations[J]. Sci Total Environ, 2017, 579: 212-220.
- [52] GILLIJ Y G, GLEISER R M, ZYGADLO J A. Mosquito repellent activity of essential oils of aromatic plants growing in Argentina [J]. Bioresour Technol, 2008, 99(7): 2507-2515.
- [53] KAPSASKI-KANELLI V N, EVERGETIS E, MICHAELAKIS A, et al. "Gold" pressed essential oil: an essay on the volatile fragment from juice industry by-products chemistry and bioactivity[J]. Biomed Res Int, 2017, 2017: 2761461.
- [54] CHENG S S, HUANG C G, CHEN Y J, et al. Chemical compositions and larvicidal activities of leaf essential oils from two eucalyptus species [J]. Bioresour Technol, 2009, 100(1): 452-456.
- [55] GIATROPOULOS A, PAPACHRISTOS D P, KIMBARIS A, et al. Evaluation of bioefficacy of three Citrus essential oils against the dengue vector *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae) in correlation to their components enantiomeric distribution [J]. Parasitol Res, 2012, 111(6): 2253-2263.
- [56] CHOI W S, PARK B S, KU S K. Repellent activities of essential oils and monoterpenes against *Culex pipiens pallens* [J]. J Am Mosq Control Assoc, 2002, 18(4): 348-351.
- [57] ALVAREZ C A, NASPI C V, LUCIA A, et al. Repellent and larvicidal activity of the essential oil from *Eucalyptus nitens* against *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae) [J]. J Am Mosq Control Assoc, 2002, 18(4): 348-51.
- [58] KLOCKE J A, DARLINGTON M V, BALANDRIN M F. 1, 8-Cineole (Eucalyptol), a mosquito feeding and ovipositional repellent from volatile oil of *Hemizonia fitchii* (Asteraceae) [J]. J Chem Ecol, 1987, 13(12): 2131-41.
- [59] FAHMY M A, MALLIPUDI N M, FUKUTO T R. Selective toxicity of *N,N*-thiodicarbamates[J]. J Agric Food Chem, 1978, 26(3): 550-556.
- [60] SAKHANOKHO H F, SAMPSON B J, TABANCA N, et al. Chemical composition, antifungal and insecticidal activities of *Hedychium* essential oils[J].

- Molecules, 2013, 18(4):4308-4327.
- [61] LIU F, CHEN L, APPEL A G, et al. Olfactory responses of the antennal trichoid sensilla to chemical repellents in the mosquito, *Culex quinquefasciatus* [J]. J Insect Physiol, 2013, 59(11):1169-1177.
- [62] TAK J H, ISMAN M B. Acaricidal and repellent activity of plant essential oil-derived terpenes and the effect of binary mixtures against *Tetranychus urticae* Koch (Acari: *Tetranychidae*) [J]. Ind Crop Prod, 2017, 108:786-792.
- [63] CHENG S S, CHUA M T, CHANG E H. Variations in insecticidal activity and chemical compositions of leaf essential oils from *Cryptomeria japonica* at different ages [J]. Bioresour Technol, 2009, 100(1):465-470.
- [64] ESSAM E. Insecticidal activity of essential oils: octopaminergic sites of action [J]. Comp Biochem Physiol C Toxicol Pharmacol, 2001, 130(3):325-337.
- [65] PARK B S, CHOI W S, KIM J H. Monoterpenes from thyme (*Thymus vulgaris*) as potential mosquito repellents [J]. J Am Mosq Control Assoc, 2005, 21(1):80-83.
- [66] PLATA-RUEDA A, CAMPOS J M, DA SILVA ROLIM G, et al. Terpenoid constituents of cinnamon and clove essential oils cause toxic effects and behavior repellency response on granary weevil, *Sitophilus granarius* [J]. Ecotoxicol Environ Saf, 2018, 156:263-270.
- [67] 徐士超,董欢欢,曾小静,等. 萜类植物源农药的筛选及活性研究进展 [J]. 林产化学与工业, 2019, 39(1):1-12.
- [68] REVAY E E, JUNNILA A, XUE R D, et al. Evaluation of commercial products for personal protection against mosquitoes [J]. Acta Trop, 2013, 125(2):226-230.
- [69] POHLIT A M, LOPES N P, GAMA R A, et al. Patent literature on mosquito repellent inventions which contain plant essential oils-a review [J]. Planta Med, 2011, 77(6):598-617.
- [70] SIBANDA M, FOCKE W, BRAACK L, et al. Bicomponent fibres for controlled release of volatile mosquito repellents [J]. Mater Sci Eng C Mater Biol Appl, 2018, 91:754-761.
- [71] GHAYEMPOUR S, Montazer M. Micro/nanoencapsulation of essential oils and fragrances: focus on perfumed, antimicrobial, mosquito-repellent and medical textiles [J]. J Microencapsul, 2016, 33(6):497-510.
- [72] MALENGIER B, GOESSENS T, MAFO F F, et al. Model-based determination of the influence of textile fabric on bioassay analysis and the effectiveness of a textile slow-release system of DEET in mosquito control [J]. Pest Manag Sci, 2015, 71(8):1165-1174.
- [责任编辑 顾雪竹]