

DOI:10.13718/j.cnki.zwyx.2025.06.002

植物次生代谢物质对烟粉虱的生物活性及作用机理研究

刘余¹, 毛敏¹, 罗升才¹, 邱金发¹,
王兴发¹, 倪仪², 周红², 丁伟²

1. 四川省烟草公司 攀枝花市公司, 四川 攀枝花 617000;

2. 西南大学 植物保护学院, 重庆 400715

摘要: 烟粉虱因其繁殖能力强、寄主范围广且易于产生抗性等生物特性, 导致其防治难度较大。在生产中, 烟粉虱常通过化学农药防治, 但其广泛使用导致抗性、复发和残留等问题, 进而对人类健康和环境产生负面影响, 已成为全球亟待解决的难题。植物源次生代谢物质因其具有新颖的作用靶点和对非靶标生物的安全性, 逐渐成为绿色防控烟粉虱的重要策略。通过回顾烟粉虱的生物学特性, 分析化学农药防治难点, 并探讨植物源次生代谢物质的杀虫活性及作用机理。研究发现: 香豆素类化合物通过调控钙离子通道活性、抑制乙酰胆碱酯酶活性表现出显著毒杀作用; 生物碱类化合物主要通过干扰乙酰胆碱受体和解毒酶活性抑制烟粉虱生理功能。植物源农药开发面临产量低、稳定性差等挑战, 但通过种类开发、机理研究、官能团改造、剂型优化等方向的持续进展, 植物次生代谢物质有望为烟粉虱防治提供绿色、安全、有效的解决方案。

关键词: 烟粉虱; 植物次生代谢物质;

杀虫作用机理

中图分类号: S433

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 2097-1354(2025)06-0013-09

Study on the Biological Activity and Mechanism of Plant Secondary Metabolites on *Bemisia tabaci*

LIU Yu¹, MAO Min¹, LUO Shengcai¹, QIU Jinfa¹,

收稿日期: 2024-12-10

基金项目: 中国烟草总公司四川省公司科技项目(SCYC202301)。

作者简介: 刘余, 主要从事烟草栽培、烟草病虫害防治等方面的研究。

通信作者: 丁伟, 教授。

WANG Xingfa¹, NI Yi², ZHOU Hong², DING Wei²

1. Sichuan Panzhihua Tobacco Company, Panzhihua Sichuan 617000, China;

2. College of Plant Protection, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: The control of *Bemisia tabaci* is challenging due to its strong reproductive ability, wide host range, and propensity to develop resistance. In production, chemical pesticides are commonly used to control whiteflies, but their widespread use has led to issues such as resistance, resurgence, and residue, which in turn negatively impact human health and the environment, becoming a global challenge that urgently needs to be addressed. Plant-derived secondary metabolites have emerged as an important strategy for green control of *B. tabaci* due to their novel targets and safety to non-target organisms. This paper reviews the biological characteristics of *B. tabaci*, analyzes the challenges of chemical pesticide control, and explores the insecticidal activity and mechanisms of plant-derived secondary metabolites. The research finds that coumarin compounds exhibit significant toxicity by regulating calcium ion channel activity and inhibiting acetylcholinesterase activity. Alkaloids mainly interfere with acetylcholine receptors and detoxifying enzymes, thus inhibiting the physiological functions of *B. tabaci*. The development of plant-derived pesticides faces challenges such as low yield and poor stability. Through continuous progress in areas such as compound development, mechanism research, functional group modification and formulation optimization, plant secondary metabolites are expected to provide green, safe, and effective solutions for control of *B. tabaci*.

Key words: *Bemisia tabaci*; plant secondary metabolites; insecticidal mechanisms

1 烟粉虱的生物学特征及防治难点

烟粉虱(*Bemisia tabaci* Gennadius)属于半翅目(Hemiptera)粉虱科(Aleyrodidae)^[1]。烟粉虱首次于1889年在希腊被发现^[2],并于1949年在我国北京首次报道,经过多年传播,已在我国新疆、沈阳、黑龙江等地区爆发成灾^[3-7]。作为一种多食性害虫,烟粉虱的寄主植物种类多达600余种,能够通过刺吸式口器取植物汁液,分泌蜜露直接危害作物。同时,烟粉虱还能够传播多种植物病毒,导致寄主植物受损^[8],对我国农业作物、园林花卉等经济作物造成严重危害^[9]。烟粉虱分泌的蜜露为煤烟病菌的生长提供了有利环境,煤烟病在叶面嫩梢上形成黑色霉斑,严重时可覆盖整个叶片,进而影响植物的光合作用,降低作物的产量和品质。烟粉虱还传播超过400种植物病害,例如,番茄黄化曲叶病(Tomato Yellow Leaf Curl Virus, TYLCV)、菜豆金色花叶病(Bean Golden Mosaic Virus, BGMV)和番茄褪绿病(Tomato Chlorosis Virus, ToCV)等^[10-11],有时其传播的病害对农作物的危害远大于其直接危害^[12-13]。

1.1 烟粉虱的生物学特性导致其防治困难

烟粉虱的生命周期包括卵、若虫、伪蛹和成虫4个阶段,历期为15~40 d^[14],在适宜温度条件下,一年可发生约20代^[15]。烟粉虱具有强大的繁殖能力,雌虫在适宜环境中每次可产卵超过200粒,且世代重叠严重^[13, 16]。不同发育阶段对化学农药的敏感性差异较大,进一步增加了防治的难度。成虫具有较强的迁飞性和爬行性,能在不同寄主植物之间快速转移,可进行短距离扩散或借助风力和气流长距离迁飞至其他作物或区域,继续繁殖并危害植物^[17-18]。烟粉虱通常分布在植物叶片背面进行危害,同时,伪蛹具有较强的形态可塑性,能够与寄主植物表皮特征相适应,使得烟粉虱种群较为隐蔽^[19]。这些生物学特性使得烟粉虱在爆发初期难以及时

采取有效防治措施,从而加剧了对农作物的危害,并在爆发期时使其防治更加困难。

烟粉虱并非单一物种,而是一个由30多种形态相似但遗传结构差异明显的隐种复合体组成。目前,我国主要的危害种群包括B型、Q型、zhj-1型等^[20-21]。不同地区的主要危害种群有所差异,而不同遗传型的种群可能对不同的防治方法表现出不同反应,导致防治效果难以预测和控制。此外,不同遗传型种群间的抗药性基因可能通过杂交等途径传播,进一步加剧抗药性问题。这些特性使得在田间防治烟粉虱时,难以制定和推广科学的防治方案,且防治药剂的选择也缺乏明确的依据。

1.2 不科学施用化学农药导致烟粉虱难防难治

随着新型化学农药的研发与广泛使用,其凭借高效的杀虫、除草能力、较为稳定的化学结构以及低廉的价格,显著提高了农业生产的经济效益^[22]。田间常用的烟粉虱杀虫剂种类繁多,包括拟除虫菊酯类、有机磷类、新烟碱类、苯吡唑类等^[23-25]。然而,长期不科学地使用这些化学农药,导致全球范围内烟粉虱的抗药性逐年增强^[25]。烟粉虱对多种常用杀虫剂(如噻嗪酮、吡虫啉、灭多威、哒螨灵、螺虫胺等)均已产生不同程度的抗药性^[26]。此外,常用的防治烟粉虱药剂(如噻虫啉、噻虫胺、呋虫胺等)对蜜蜂、家蚕等有益生物具有较强毒性^[27],其中新烟碱类化合物不仅可导致蜜蜂急性中毒死亡,还会影响其觅食、发育等行为^[28]。化学农药的使用不仅对有益昆虫和微生物造成毒害,还可能影响农作物的生长。例如,甲胺磷处理小麦后,可能导致苗高降低、根长缩短和干质量下降^[29]。

因此,开发高效、长效、特异性强、环境污染少、对烟粉虱各龄期均有效的安全新型农药已成为当务之急^[30]。植物次生代谢物质是植物在长期自然进化过程中,在遭遇环境胁迫、病虫害侵害以及植物间竞争等逆境时,体内形成并积累的大量具有自我防御功能的化合物^[31-32]。这些化合物通常具有生物降解性和低毒性,对环境和非靶标生物的影响较小^[33-35]。与化学农药相比,植物次生代谢物质具有更为特殊的靶标位点和更为复杂的杀虫作用机理^[36-37],能够对多种有害生物展现良好的生物活性,同时对非靶标生物安全。由于植物次生代谢物质多为植物提取物,因此对植株相对安全,且不易引发药害现象。

2 植物次生代谢产物对烟粉虱的不同生物活性

常见的植物源次生代谢物质根据其活性成分可分为香豆素类、黄酮类、生物碱类、萜烯类、萜烯类、木脂素类和其他类。这些物质不仅具有较好的杀虫活性,还表现出抑菌、杀鼠、除草等生物活性。例如,香豆素类化合物对朱砂叶螨^[38]、棉蚜^[39]、线虫^[40]、灰飞虱^[41]等多种生物具有毒杀作用;此外,它们还能够抑制 α -淀粉酶的活性,从而影响黑麦草^[42]、鬼针草^[43]等杂草的正常萌发;并且通过调控青枯雷尔氏菌脂多糖合成,破坏细胞膜结构,抑制青枯菌的生长^[44]。

2.1 趋避与引诱

通过将不同浓度的植物次生代谢产物喷洒在番茄植株表面,发现多种植物的次生代谢物质对烟粉虱具有驱避效果,能有效减少烟粉虱在植株上产卵。例如,花椒(*Zanthoxylum bungeanum*)和陈皮精油等芸香科植物提取物对烟粉虱成虫具有驱避作用^[35];芒萁(*Dicranopteris pedata*)和尾叶桉(*Eucalyptus urophylla*)对烟粉虱的驱避效果超过85%;马兜铃(*Aristolochia debilis*)和香茅(*Cymbopogon citratus*)的驱避效果则在70%以上^[45];苦楝(*Melia azedarach*)的果实和叶片的甲醇和水提取物均对烟粉虱展现了较好的驱避作用。除了驱避作用,部分植物的产物还具备引诱烟粉虱在其上产卵的能力,例如,柑橘(*Citrus reticulata* Blanco)、螫螟菊

(*Sphagneticola calendulacea*)、薄荷(*Mentha canadensis*)等天然精油,以及蓖麻(*Ricinus communis*)和海滨锦葵(*Kosteletzkya virginica*)的叶片乙醇提取物,这些物质能够与驱避剂共同作用,进一步增强对植株的保护效果^[46]。

2.2 毒杀作用

通过研究不同植物天然产物对烟粉虱的毒性,发现大多数植物提取物表现出较高的杀虫活性。以下是几种植物提取物对烟粉虱的毒力总结。

表1 不同植物次生代谢产物对烟粉虱的毒力及作用机理

化合物	作用	LC ₅₀	参考来源
印楝素	触杀毒性	3.20 mg/L	[47]
1,8-桉叶	熏蒸毒性	61.30 mg/L	[48]
辣椒碱	触杀毒性	3 525.80 mg/L	[49]
β-细辛酮	胃毒	4.70 mg/L	[50]
蛇床子氯仿提取物	触杀毒性	3.91 mg/mL	[51]
绿原酸	胃毒	0.93 mg/L	[52]
鱼藤酮	触杀毒性	12.29 mg/L	[53]
吡氟啶嗪	触杀毒性	0.54 mg/L	[54]
胡椒精油	触杀毒性	9.39 uL/L	[54]
大蒜精油	触杀毒性	10.99 uL/L	[55]
百里香酚	胃毒	0.19 mg/L	[56]
薄荷精油	熏蒸毒性	2.20 mL/L	[57]

2.3 其他作用

植物次生代谢物质对烟粉虱的作用方式不仅限于杀虫。例如,大蒜(*Allium sativum* L.)乙醇提取物不仅能显著干扰烟粉虱种群的正常生理活动,还具有拒食作用;辣椒碱除了对烟粉虱成虫具有熏蒸毒性外,还能显著表现出拒食作用^[58];印楝素对烟粉虱具有毒杀、拒食、趋避及干扰生长等多重作用^[47];吡氟啶嗪不仅能引起烟粉虱的拒食反应,还能抑制番茄褪绿病(Tomato Chlorosis Virus, ToCV)病毒的传播^[54];泽漆(*Euphorbia helioscopia*)正丁醇提取物对烟粉虱的若虫和伪蛹具有良好的毒杀效果,还能显著降低成虫的羽化率^[59];天竺葵(*Pelargonium hortorum*)精油通过减少烟粉虱的取食危害,进而避免或减少病毒的传播^[60];腰果(*Anacardium occidentale*)壳提取物中的主要成分漆树酸(76.93%)对烟粉虱具有毒杀作用,并能抑制其产卵^[61]。

3 植物次生代谢物质对烟粉虱的作用机制

香豆素类化合物属于芳香族化合物,其主要化学结构为苯并吡喃酮,广泛分布于植物界,尤其在伞形科、芸香科、菊科、豆科、兰科等植物中含量丰富。这类化合物具有抗菌、杀虫、除草、杀鼠、抑菌等多种生物活性^[32]。尽管尚未有明确的研究报告香豆素类化合物对烟粉虱的杀虫作用机理,但已有研究总结了其对多种刺吸类害虫的杀虫机制。例如,东莨菪内酯处理朱砂

叶螨(*Tetranychus cinnabarinus*)后,可使 Ca^{2+} —ATP 酶的空间构象发生变化,导致其活性功能丧失,从而使钙离子信号传递受阻,最终导致朱砂叶螨死亡^[62]。此外,蛇床子素处理朱砂叶螨后,昆虫体内解毒代谢酶 CarE 和 GST 活性显著降低^[63]。6-甲氧基当归素和 4-甲氧基香豆素均能抑制褐飞虱(*Nilaparvata lugens*)体内的 GST 酶活性,其中 6-甲氧基当归素还具有较强的乙酰胆碱酯酶抑制活性^[41]。6-甲基香豆素的主要杀蚜作用是通过抑制乙酰胆碱酯酶(AChE)活性^[39]。因此,香豆素类化合物的主要杀虫机制可能是通过直接或间接调控钙离子通道活性。

生物碱是一类含氮的碱性有机化合物,大多数具有复杂的环状结构,氮元素通常位于环内。生物碱是人类最早开发并应用于植物源杀虫剂的一类物质^[64]。低浓度短时间的辣椒碱处理会激活烟粉虱体内的解毒酶 CarE 和 GSTs;而在高浓度、长时间处理下,烟粉虱体内 CarE 和 GSTs 的活性则显著抑制。处理 24 h 后,乙酰胆碱酯酶活性也受到抑制^[65]。此外,烟碱型乙酰胆碱受体 $\beta 1$ 亚基的敲除显著降低了烟粉虱对吡虫啉、噻虫胺、噻虫啉、烯啶虫胺和呋虫胺的敏感性^[66],进一步表明生物碱类化合物对烟粉虱的杀虫靶标主要为乙酰胆碱酯酶受体^[67-68]。

其他植物次生代谢物质的杀虫作用机理已有较多报道。例如,鱼藤酮及其衍生物通过作用于电子传递链上的线粒体呼吸酶复合体 I 来发挥杀虫效果^[69-70]。印楝素的主要杀虫机理包括降低中肠消化酶的活性、抑制血淋巴中多种羧酸酯酶的活性、破坏体内激素平衡以及干扰害虫的呼吸节律等^[71-72]。蒽醌类化合物的杀虫机理可能是通过促进乙酰胆碱酯酶活性升高,从而阻碍神经传递^[73]。然而,关于不同植物次生代谢物质对烟粉虱的杀虫作用靶标位点的研究仍相对匮乏,需要进一步加强相关研究,以便得出更加科学和合理的结论。

4 展望

近年来,随着国家倡导农药和化肥“减量增效”政策的实施以及消费者对绿色食品需求的增加,开发绿色、安全且高效的新型农药已逐渐成为我国农业研究的重点。经过多年的研究,已经发现了许多新型植物源农药。截至目前,我国已登记的植物源农药有效成分达到 30 种,登记证书 351 个,年产量达到数千吨^[74]。其中,生物碱类杀虫剂是植物源农药的重要组成部分,已知生物碱类化合物约有 12 000 种,国内市场上共有 148 个相关产品登记,例如,苦参碱、藜芦碱和小檗碱等已被广泛应用于农业生产^[75]。鱼藤酮类农药的登记数量已超过 25 个,涵盖乳油、微乳剂、原药等多个剂型,其中以乳油剂型为主;此外,萜烯类杀虫剂,包括苦皮藤素、印楝素、d-柠檬烯、桉油精等,也被广泛应用。

表 2 我国已登记植物源杀虫剂

农药类型	活性成分	登记数量/个	主要剂型	防治对象
生物碱类	苦参碱	128	水剂、可湿性粉剂	大螟、茶尺蠖、烟青虫、蓟马
	藜芦碱	11	可溶液剂、水乳剂、乳油等	棉铃虫、小菜蛾、茶橙瘿螨
黄酮类	鱼藤酮	25	水剂、悬浮剂、微乳剂等	菜青虫、蚜虫
	苦皮藤素	7	水乳剂、乳油	甜菜夜蛾、尺蠖、甘蓝黄条跳甲
萜烯类	印楝素	16	粉剂、微乳、乳油	小菜蛾、茶黄螨、赤拟谷盗
	香芹酚	7	水剂、原药等	柑橘木虱、蚜虫、螟虫
香豆素类	蛇床子素	21	可溶液剂、粉剂、乳油等	菜青虫、茶尺蠖、谷蠹、书虱

尽管已经筛选出多种具有开发潜力的农药活性植物资源,但在实际开发与应用过程中,仍受到多种因素的制约,暴露出诸多亟待解决的问题。目前开发的植物次生代谢物质种类较少、产量低,难以实现大规模应用推广^[76-77];植物次生代谢物质稳定性差,易受光照或空气分解^[78];对植物次生代谢物质的化学成分及其杀虫机理的研究较为不足^[79]等。为了更好地将植物次生代谢物质作为杀虫剂应用于实际生产,还需不同领域的专家学者加强合作,深入研究植物次生代谢物质的杀虫机理与昆虫适应机制,构建植物次生代谢物质杀虫效果的预测模型,推动农药产业转型升级,开发以植物次生代谢物质为基础的新型农药产品,以满足现代农业生产的需求。

参考文献:

- [1] 褚栋,张友军.近10年我国烟粉虱发生为害及防治研究进展[J].植物保护,2018,44(5):51-55.
- [2] GENNADIUS P. Disease of Tobacco Plantations in the Trikonis[J]. The Aleurodid of Tobacco, 1989, 5: 1-3.
- [3] 张君明,张帆,王甦.设施蔬菜烟粉虱绿色防治技术探讨[J].农业工程技术,2020,40(19):71-73.
- [4] 李增丽.沈阳地区设施蔬菜害虫和天敌种类调查及粉虱防治技术研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2019.
- [5] 景伟明,张文超,张会亚,等.关中西部设施蔬菜烟粉虱危害规律研究及防治[J].蔬菜,2016(5):71-73.
- [6] 张长明.设施栽培蔬菜主要害虫的发生与无害化治理对策[J].中国农业信息,2013,25(17):91.
- [7] 谈星,郑慧新,季尧,等.田间烟粉虱种群对5种杀虫剂的抗性监测[J].中国蔬菜,2021(5):64-69.
- [8] 李萌.烟粉虱—双生病毒—寄主植物互作及植物防御机制研究[D].杭州:浙江大学,2010.
- [9] 范晓凡,刘勇,谭新球,等.番茄褪绿病毒对MED烟粉虱成虫在不同寄主植物上的寄主选择性和取食行为的影响[J].昆虫学报,2022,65(8):1018-1025.
- [10] 关雪,胡琼波.烟粉虱传播的植物病毒病及其化学防治研究进展[J].广东农业科学,2020,47(6):63-69.
- [11] VEENSTRA K H, BYRNE D N. Does Dispersal Affect the Reproductive Physiology of the Sweet Potato Whitefly, *Bemisia tabaci*? [J]. Physiological Entomology, 1999, 24(1): 72-75.
- [12] 向玉勇,李子忠,张帆,等.烟粉虱和温室粉虱的研究进展[J].山地农业生物学报,2004,23(4):352-359.
- [13] XIANG Y Y, LI Z Z, ZHANG F, et al. Progress of Study on *Bemisia tabaci* (Gennadius) and *Trialeurodes vaporariorum* (Westwood) [J]. Journal of Mountain Agriculture and Biology, 2004, 23(4): 352-359.
- [14] 杨妮娜,张友军,杨鑫,等.烟粉虱不同发育阶段解毒代谢酶基因的特异性表达[J].昆虫学报,2016,59(11):1166-1173.
- [15] BUTLER G D J, HENNEBERRY T J, CLAYTON T E. *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae): Development, Oviposition, and Longevity in Relation to Temperature [J]. Annals of the Entomological Society of America, 1983, 76(2): 310-313.
- [16] 崔旭红,郑丹,蒲桂林,等.温度对B型、Q型烟粉虱生长发育、存活和繁殖的影响[J].植物保护学报,2009,36(6):571-572.
- [17] HU J, ZHANG X Y, JIANG Z L, et al. New Putative Cryptic Species Detection and Genetic Network Analysis of *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) in China Based on Mitochondrial COI Sequences [J]. Mitochondrial DNA Part A, 2018, 29(3): 474-484.
- [18] LIU S S, COLVIN J, DE BARRO P J. Species Concepts as Applied to the Whitefly *Bemisia tabaci* Systematics: How Many Species Are There? [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2012, 11(2): 176-186.
- [19] 方华,褚栋,丛斌,等.B型烟粉虱不同寄主种群伪蛹形态的可塑性比较[J].昆虫知识,2008,45(4):585-588,677.
- [20] BROWN J K, FROHLICH D R, ROSELL R C. The Sweetpotato or Silverleaf Whiteflies: Biotypes of *Bemisia tabaci* or a Species Complex? [J]. Annual Review of Entomology, 1995, 40: 511-534.

- [21] BOYKIN L M, SHATTERS R G, ROSELL R C, et al. Global Relationships of *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) Revealed Using Bayesian Analysis of Mitochondrial COI DNA Sequences[J]. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 2007, 44(3): 1306-1319.
- [22] 单承莺, 马世宏, 张卫明. 我国植物源农药研究进展[J]. *中国野生植物资源*, 2011, 30(6): 14-18, 23.
- [23] 沈祥祥. 烟粉虱高毒力昆虫病原真菌筛选及其应用研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2019.
- [24] 沈兰兰. 防治烟粉虱药剂增效配方筛选及其生化机理[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2017.
- [25] 张鑫, 王文卿, 靳改龙, 等. 两种烟熏剂对设施蔬菜上烟粉虱及海氏桨角蚜小蜂(*Eretmocerus hayati*)的毒力测定[J]. *新疆农业科学*, 2017, 54(8): 1469-1474.
- [26] LUO C, JONES C M, DEVINE G, et al. Insecticide Resistance in *Bemisia tabaci* Biotype Q (Hemiptera: Aleyrodidae) from China[J]. *Crop Protection*, 2010, 29(5): 429-434.
- [27] 何丽华. 基于登记试验的农药对环境影响分析[J]. *农药科学与管理*, 2016, 37(6): 31-34.
- [28] 张伟, 齐素贞, 薛晓锋, 等. 农药对蜜蜂的影响及毒理学机制研究进展[J]. *农药学报*, 2022, 24(5): 1125-1138.
- [29] 李英梅, 白青, 王周平, 等. 烟粉虱与番茄黄化曲叶病毒病发生关系研究[J]. *中国农学通报*, 2019, 35(4): 102-107.
- [30] 李卓丽, 许见辉, 李启东, 等. 植物源杀虫剂研究进展[J]. *中国农学通报*, 2022, 38(21): 97-104.
- [31] 李忠榜. 喜树碱衍生物合成及杀虫活性研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2015.
- [32] 刘瑾林, 周红, 郭富友, 等. 香豆素类化合物的农药活性及东莨菪内酯杀螨作用机理研究进展[J]. *农药学报*, 2019, 21(5): 692-708.
- [33] 张咏梅. 苜蓿总黄酮的提取方法、药效以及多种豆科牧草次生代谢产物的研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2008.
- [34] 侯秋莉. 东莨菪内酯对朱砂叶螨 Ca^{2+} -ATP 酶的抑制作用及靶标位点预测[D]. 重庆: 西南大学, 2015.
- [35] 尉吉乾, 梁世优, 莫建初, 等. 植物提取物对 B 型烟粉虱的驱避效果研究[J]. *环境昆虫学报*, 2015, 37(3): 598-603.
- [36] 苗沛芳. 植物源杀螨剂的研究现状及展望[J]. *植物医生*, 2008(3): 4-6.
- [37] 周红. 东莨菪内酯对朱砂叶螨致毒作用的钙通道相关基因研究[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- [38] 张梦宇. 茄子对朱砂叶螨的茉莉酸防御反应及叶螨的适应机制[D]. 重庆: 西南大学, 2021.
- [39] ZHOU H, JIAN Y F, SHAO Q Y, et al. Development of Sustainable Insecticide Candidates for Protecting Pollinators: Insight into the Bioactivities, Selective Mechanism of Action and QSAR of Natural Coumarin Derivatives Against Aphids[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2023, 71(47): 18359-18374.
- [40] 卓淳淳. 香豆素类衍生物制备及其抗松线虫活性[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2015.
- [41] 尚小飞. 四类天然产物的生物活性评价及作用机制研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [42] 何秀龙. 香豆素抑制黑麦草种子萌发及生长的机制[D]. 重庆: 西南大学, 2019.
- [43] 胡玲. 香豆素与香草酸对入侵植物鬼针草(*Bidens pilosa*)种子萌发和幼苗生长的影响研究[D]. 重庆: 西南大学, 2021.
- [44] 杨亮. 羟基香豆素类化合物对青枯雷尔氏菌致病特性的调控作用研究[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
- [45] 杨秀芬, 梁广文. 植物次生物质对烟粉虱成虫产卵的驱避作用研究[C]//昆虫与环境——中国昆虫学会 2001 年学术年会论文集. 成都, 2001: 44-49.
- [46] 周福才, 周桂生, 李传明, 等. 三种生物质能源植物组织的乙醇提取液对烟粉虱生物活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(3): 603-608.
- [47] 文吉辉. 印楝素对 B 型烟粉虱实验种群的生物活性[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2007.
- [48] AYLLÓN-GUTIÉRREZ R, LÓPEZ-MALDONADO E A, MACÍAS-ALONSO M, et al. Evaluation of the Stability of a 1, 8-Cineole Nanoemulsion and Its Fumigant Toxicity Effect Against the Pests *Tetranychus urticae*,

- Rhopalosiphum Maidis and *Bemisia tabaci*[J]. Insects, 2023, 14(7): 663.
- [49] 吴咚咚, 赵建伟, 陈颖, 等. 辣椒碱对烟粉虱体内羧酸酯酶、谷胱甘肽 S-转移酶和乙酰胆碱酯酶活性的影响[J]. 生物安全学报, 2012, 21(2): 109-113.
- [50] WANG R, FANG Y, CHE W N, et al. The Toxicity, Sublethal Effects, and Biochemical Mechanism of B-Asarone, a Potential Plant-Derived Insecticide, Against *Bemisia tabaci*[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(18): 10462.
- [51] 宋珊珊. 几种中药提取物对二斑叶螨和烟粉虱的生物活性及其解毒代谢酶活性测定[D]. 银川: 宁夏大学, 2017.
- [52] WANG R, ZHANG Q H, QU C, et al. Toxicity, Baseline of Susceptibility, Detoxifying Mechanism and Sublethal Effects of Chlorogenic Acid, a Potential Botanical Insecticide, on *Bemisia tabaci*[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1150853.
- [53] 毛晓红, 陈鹏, 曹长代, 等. 鱼藤酮与 3 种新烟碱类杀虫剂桶混对烟粉虱和烟蚜的联合毒力[J]. 中国农学通报, 2021, 37(30): 98-105.
- [54] WEN Z R, FENG J Z, ZHU B L, et al. Pyriproxyfen Baseline Susceptibility and Inhibition of Tomato Chlorosis Virus Transmission by *Bemisia tabaci*[J]. Pest Management Science, 2023, 79(10): 3520-3528.
- [55] DA SILVA SANTANA A, BALDIN E L L, LIMA A P S, et al. New Challenges Demand New Solutions: Selected Essential Oils as an Alternative to Control *Bemisia tabaci* MED in Brazil[J]. Crop Protection, 2022, 155: 105909.
- [56] 张静, 叶火春, 陈礼浪, 等. 5%百里香酚热雾剂对烟粉虱的杀虫活性[J]. 热带农业科学, 2018, 38(12): 87-90, 95.
- [57] TOPUZ E. Insecticidal Activity of Mentha Pulegium Essential Oil Against Thrips Tabaci, *Bemisia tabaci* and Tuta Absoluta Adults[J]. International Journal of Tropical Insect Science, 2023, 43(5): 1475-1483.
- [58] 赵建伟, 郑宇, 何玉仙, 等. 辣椒碱对烟粉虱的生物活性及生长发育和生殖力的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(2): 531-535.
- [59] 王丽莎, 任淑芳, 郭线茹, 等. 泽漆提取物对烟粉虱触杀活性的初步研究[J]. 华中昆虫研究, 2012: 139-142.
- [60] DOS SANTOS M C, LIMA A P, FARIAS A P, et al. Effect of Pelargonium Graveolens Essential Oil and Cy-antraniliprole on the Feeding Behavior of *Bemisia tabaci* MED[J]. Entomologia Experimentalis et Applicata, 2024, 172(9): 768-776.
- [61] ANDAYANIE W R, NURIANA W, ERMAWATY N. Bioactive Compounds and Their Their Antifeedant Activity in the Cashew Nut (*Anacardium Occidentale* L.) Shell Extract Against *Bemisia tabaci*, (Gennadius, 1889) (Hemiptera: Aleyrodidae)[J]. Acta Agriculturae Slovenica, 2019, 113(2): 281-288.
- [62] 赖婷. 东莨菪内酯酚醚衍生物合成及其杀螨活性的构效关系[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- [63] HAO M, LV M, ZHOU L, et al. Construction, Pesticidal Activities, Control Effects, and Detoxification Enzyme Activities of Osthole Ester/Amide Derivatives[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70(30): 9337-9345.
- [64] 蔡璞瑛, 毛绍名, 章怀云, 等. 植物源杀虫剂国内外研究进展[J]. 农药, 2014, 53(8): 547-551, 557.
- [65] 吴咚咚, 赵建伟, 陈颖, 等. 辣椒碱对烟粉虱体内羧酸酯酶、谷胱甘肽 S-转移酶和乙酰胆碱酯酶活性的影响[J]. 生物安全学报, 2012, 21(2): 109-113.
- [66] 王文龙. 华东地区 Q 型烟粉虱对新烟碱类杀虫剂的抗性监测及其靶标基因克隆[D]. 扬州: 扬州大学, 2015.
- [67] 刘雨晴, 薛明, 周方园, 等. 黄荆种子总生物碱对棉蚜无翅成蚜的毒力及其对几种酶活性的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2011, 20(3): 43-50.
- [68] 罗万春, 李云寿, 慕立义, 等. 苦豆子生物碱对萝卜蚜的毒力及其对几种酯酶的影响[J]. 昆虫学报, 1997, 40(4): 358-365.

- [69] DEGLI ESPOSTI M. Inhibitors of NADH - Ubiquinone Reductase: An Overview[J]. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics*, 1998, 1364(2): 222-235.
- [70] DARROUZET E, ISSARTEL J P, LUNARDI J, et al. The 49-kDa Subunit of NADH-Ubiquinone Oxidoreductase (Complex I) Is Involved in the Binding of Piericidin and Rotenone, Two Quinone-Related Inhibitors[J]. *FEBS Letters*, 1998, 431(1): 34-38.
- [71] 田雨浓. 四种萜烯单体对大麦虫生物活性及其作用机理研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
- [72] LI L, SONG X, YIN Z, et al. Insecticidal Activities and Mechanism of Extracts from Neem Leaves Against *Oxya Chinensis*[J]. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, 2019, 71(1): 1-10.
- [73] 孙印石. 虎杖花对丝光绿蝇毒杀活性成分及致毒机理研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2014.
- [74] 张正伟, 郗厚诚, 常文程, 等. 我国植物源农药商品化应用现状及产业发展建议[J]. *世界农药*, 2020, 42(12): 6-15.
- [75] 章杰, 罗巧, 刘科, 等. 植物源生物碱类杀虫剂及其登记应用进展[J]. *世界农药*, 2023, 45(3): 13-22.
- [76] 孙盼盼. 21种植物源物质对金银花蚜虫生物活性的影响及增效性研究[D]. 济南: 山东中医药大学, 2021.
- [77] 李佳, 孙盼盼, 刘谦, 等. 一种用于金银花的杀虫剂复配载药微球及其制备方法: CN202210154632.8[P]. CN114521554A[2025-09-02].
- [78] 赵家永, 邓先明, 温兴莲, 等. 21世纪植物源农药开发利用现状与展望[J]. *植物医生*, 2002, 25(1): 2-3.
- [79] 万凤琳, 周红, 郭富友, 等. 滨蒿内酯的生物活性研究进展[J]. *植物医生*, 2020, 33(3): 12-17.

责任编辑 苏荣艳