

花椒蛀干害虫——花椒窄吉丁研究进展

刘欣玉 白妍妍 戚煜 赵盈盈 刘保志 吕淑杰 谢寿安*

(西北农林科技大学林学院, 杨凌 712100)

摘 要: 花椒是我国林业特色产业之一, 花椒产业的发展对促进林农增收、实现乡村振兴具有十分重大的现实意义。随着全国花椒种植面积不断扩大, 花椒病虫害也呈逐年加重的态势, 其中, 花椒窄吉丁是我国花椒产区的毁灭性蛀干害虫, 防控难度极大。本文在回顾花椒窄吉丁研究现状的基础上, 指出存在的相关理论及技术问题, 并讨论了未来的研究方向, 以期今后花椒窄吉丁的绿色防控工作提供参考。

关键词: 花椒; 蛀干害虫; 花椒窄吉丁; 害虫综合防治; 研究进展

Research progress on the wood borers *Agrilus zanthoxylumi* in *Zanthoxylum bungeanum*

LIU Xin-Yu, BAI Yan-Yan, QI Yu, ZHAO Ying-Ying, LIU Bao-Zhi, LV Shu-Jie, XIE Shou-An*

(Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: *Zanthoxylum bungeanum* is one of the forestry characteristic industries in our country. The development of industry in *Z. bungeanum* is of great practical significance to promote the income increase of forest farmers and realize the rural revitalization. With the continuous expansion of the planting area of *Z. bungeanum*, the diseases and pests of *zanthoxylum* are also increasing year by year. Among them, *Agrilus zanthoxylumi* is a devastating dry moth pest in the production area of *Z. bungeanum* in China, and it is very difficult to control. Based on the review of the current research status of *A. zanthoxylumi*, this paper points out the existing theoretical and technical problems, and discusses the future research direction, in order to provide reference for future research work.

Key words: *Zanthoxylum bungeanum*; wood borers; *Agrilus zanthoxylumi*; integrated pest management; research progress.

花椒(*Zanthoxylum bungeanum* Maxim)隶属于芸香科(Rutaceae)、花椒属(*Zanthoxylum*), 为多年生落叶灌木或小乔木, 主要生长在温带、亚热带地区。亚洲是花椒的主产区, 除中国外, 在日本、韩国、朝鲜等国也均有分布(Fei et al., 2021)。花椒属植物的资源十分丰富, 在全球约有250个品种, 其中长期栽培的品种有45种, 国内占13个栽培品种(Sun et al., 2019; Xu et al., 2023)。花椒原产于中国东部, 现在我国陕西、河北、山西、山东、四川、重庆、云南、湖北及甘肃等省区都有栽培(Yang et al., 2013; 李亚南等, 2022)。作为诸多地区的主要经济树种, 花椒具有极高的经济价值、药用价值以及生态价值(吉波等, 2020; 陈在辉, 2022)。同时, 花椒产业也具有非常广阔的市场前景, 在促进生态文明建设、乡村振兴和区域经济发展中发挥着重要作用。

随着花椒产业的不断扩大和发展, 其栽培面积和产量均为世界第一(刘函如等, 2023)。同时, 在自然选择的压力下, 花椒树的病虫害种类已经达到190余种, 防治难度也逐年加大(乔旭, 2010; 银航等, 2018; 朱建义等, 2024)。花椒的病害大多是由真菌引起, 还有一部分是由原生动物、线虫等引起(庄丽娟, 2013)。如: 花椒根腐病、花椒锈病、花椒落叶病(又名黑斑病)、花椒黑胫病(亦称疫霉病、流胶病)、花椒枯穗病和花椒根结线虫病; 也有少部分属于虫害感染以后的继发性病害, 如棉蚜受害椒发生的煤污病、窄吉丁受害椒发生的流胶病等(刘峰等, 2013; 曹业凡等, 2019; 吴跃开, 2023; 李培琴等, 2023)。花椒的虫害大多是由昆虫纲的动物引起, 少部分由蜱螨纲的动物引起(吉波等, 2020)。如: 花椒窄吉丁(*Agrilus zanthoxylumi*)、花椒虎天牛(*Clytus valiandus* Fairmaire)、花椒凤蝶,

基金项目: 国家公益性行业(林业)科研项目(201504324); 陕西省第二批特支计划领军人才项目(陕组通字2020-44号); 2022年度西安市科技计划项目(2022JH-JSYF-0261)。

作者简介: 刘欣玉, 女, 1994年7月生, 陕西汉中, 博士研究生, 研究方向为林业有害生物防治, E-mail: xinyuli2023@nwafu.edu.cn

*通讯作者 Corresponding authors, E-mail: shouanxie@163.com

即柑橘凤蝶 (*Papilio xuthus* Linnaeus)、花椒波瘿蚊 (*Asphondylia zanthoxyli* Bu et Zheng)、花椒蚜虫主要是棉蚜 (*Aphis gossypii* Glover) 和苹果瘤蚜 (*Myzus malisutus* Matsumura)、花椒蚧壳虫主要有柑橘绿绵蚧 (*Chloropulvinaria aurantia* Cockerell) 和花椒绵粉蚧 (*Phenacoccus azaleae* Kuwana)。其中尤以蛀干害虫花椒窄吉丁 (*Agrilus zanthoxylumi*) 的为害最为严重, 造成花椒产品的品质 and 经济效益下降 (张晓明等, 2009)。但由于花椒本身就含有驱虫性的物质, 如 γ -山椒素等, 因此侵害花椒的害虫比其他作物上的害虫更难防治。此外, 随着椒农大量使用化学农药, 使得各类昆虫的抗药性随着人工选择的进化而逐年上升, 使得防治愈发困难。并且大量化学农药的使用所带来的高残留也严重限制了花椒品质的提升。

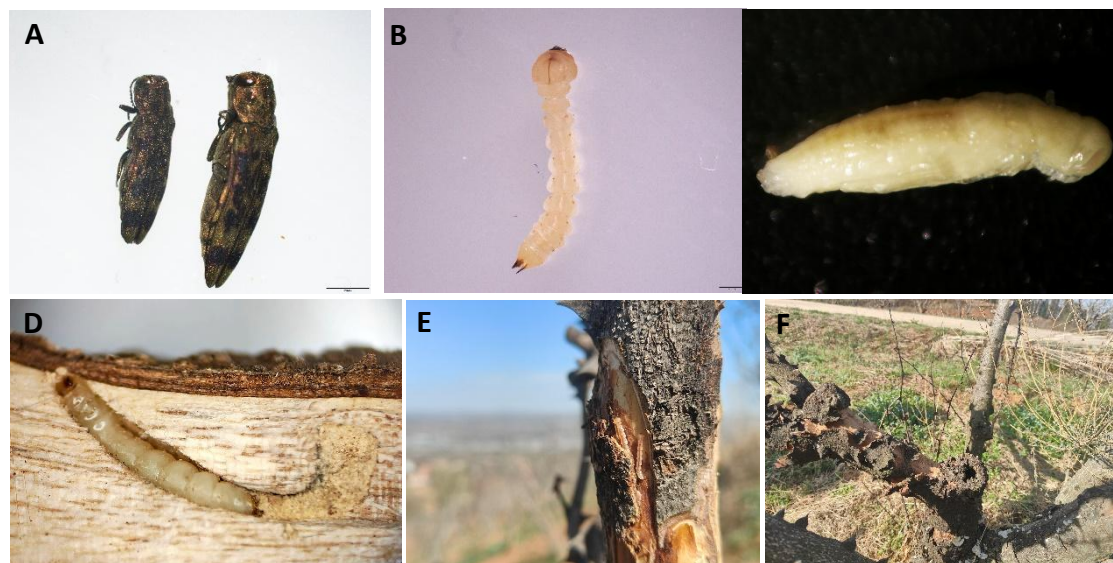
因此, 为了对花椒窄吉丁及其防治技术进行深入研究, 本文系统总结了花椒窄吉丁的生物学、地理分布、危害特征及防治技术等方面的研究进展, 并探讨了有关花椒窄吉丁的研究方向和研究趋势, 旨在为花椒窄吉丁的绿色防控提供理论依据。

1 花椒窄吉丁的生物学特性

1.1 形态学特征

花椒窄吉丁属于鞘翅目 (Coleoptera)、吉丁虫科 (Buprestidae)、窄吉丁属 (*Agrilus*), 是我国花椒产区的毁灭性蛀干害虫 (高晓进等, 2023)。卵呈椭圆形, 大小约 0.05 cm, 初产时乳白色, 后渐变为淡黄色或红褐色, 孵化前呈暗黄色; 幼虫体型扁平呈乳白色, 体长 2.5 cm 左右; 蛹从乳白色逐渐转变为暗黄色, 并在羽化前变成古铜色, 体长约 0.9 cm, 宽度约 0.3 cm; 成虫身体细长, 有光泽, 长度约 0.7 cm, 宽度约 0.2 cm, 雌虫稍大于雄虫; 复眼为肾形, 呈棕褐色; 触角为黑褐色锯齿状结构, 生长在复眼之间的触角窝内, 共 11 节 (包括柄节、梗节和鞭节), 具刚毛; 鞘翅呈铜色, 其端部为钝圆形; 腹面呈黑褐色, 腹中部两侧及尾端略外露 (吴海, 2006; 高焕婷和张国龙, 2007)。

(图片拍摄: 刘欣玉)



(A: 成虫—左雄右雌 Adult of *A. zanthoxylumi*; B: 幼虫 Larva; C: 蛹 Pupa; D-E: 幼虫坑道 Galleries of *A. zanthoxylumi* larvae; F: 被花椒窄吉丁危害致死的花椒树 *Z. bungeanum* trees were killed by *A. zanthoxylumi*)

图 1 花椒窄吉丁及其害状

Fig.1 *A. zanthoxylumi* and its damage

1.2 生活史

花椒窄吉丁每年发生一代, 幼虫会选择在树干木质部或树皮之下越冬 (许新娟等, 2020)。次年四月中旬, 幼虫开始活跃并摄取食物, 四月中下旬达到进食高峰期; 五月初开始化蛹, 此阶段持续时间为 28-43 天, 五月中下旬则是化蛹的盛期; 自六月初起, 成虫开始从羽化孔中飞出, 至七月中旬, 几乎所有的成虫都已完成羽化, 整个成虫期的时间为 8-21 天; 成虫产卵时间主要集中在六月中下旬, 七月上旬为产卵的高峰期, 卵的孵化期为 9-15 天。羽化后的成虫在当天或次日中午就能进行交尾并产卵, 同时取食花椒叶片补充营养, 成虫将卵多散产于树体中下部枝干树皮的小裂缝、皮刺根基、小枝桠基部等处。初孵幼虫高发期集中在

6月底至7月中旬,且幼虫对植物的危害会一直延续到11月底,后进入越冬状态,整个幼虫阶段持续时间长达240-280天(李孟楼等,1990;吴海,2006;高焕婷和张国龙,2007;孟玲等,2015)。

1.3 地理分布

花椒窄吉丁是我国花椒种植区发生的最为普遍和严重的虫害之一(权丽君,2016)。该虫是首次发现于我国山东的蛀干害虫,且严重危害陕西、甘肃、四川、贵州、山西、河南和山东等地的花椒(吉波等,2020;刘三斤等,2024)。其中陕西省以蓝田、安康、韩城、渭南、富平、泾阳和宜川县等地虫害较为严重;甘肃省武都、天水、文县的花椒园区发生较为严重(曹发岭和许国辉,2000;王燕等,2012;曾燕妮,2015;卢凯洁等,2016;曹晶等,2021)。随着我国花椒栽培面积的逐年增大,病虫害问题日益严峻,造成当地花椒产量减少与品质降低,严重制约了当地经济发展和生态环境建设(曹晶等,2021)。

1.4 危害特点

花椒窄吉丁作为花椒树的毁灭性害虫,无论是成虫或幼虫均可对花椒树产生严重危害。成虫在补充营养时,会咬食花椒的叶片,导致叶片上留下明显缺刻或空洞(高焕婷和张国龙,2007)。产卵时将卵产在树皮内,造成被害树皮流胶、变软和腐烂(李孟楼等,1990)。幼虫孵化后,首先危害距离地面10-60 cm范围内的枝干韧皮部,然后取食韧皮部并逐渐向内蛀食形成层,由此形成细长且弯曲如线条的虫道。幼虫在生长发育过程中会逐渐深入树皮内部进行蛀食,使虫道不断扩展。最终,深入木质部并在形成层与木质部之间留下不规则的蛀道,其中充满了幼虫排泄物,可直接导致形成层的断裂(吉波等,2020)。当幼虫严重蛀食树干底部的树皮和形成层时,可以直接截断树体养分传输,进而导致树皮组织部位坏死、干枯和龟裂等,遇雨还可能发生剥落和腐烂等现象,造成整个花椒树体呈现衰弱状态,进而影响花椒的产量与质量,严重时可能导致整株花椒树死亡(赵灵爱,1999;许新娟等,2020;刘函如等,2023)。近年来,花椒窄吉丁在花椒产业的发展过程中构成了巨大威胁,给椒农带来了严重的经济损失(权丽君,2016)。因此,如何更高效、更环保地防治花椒窄吉丁已引起广大椒农和病虫害防治部门的高度重视。

1.5 防治现状

为了减少花椒窄吉丁的传播和危害,必须采取必要手段对花椒窄吉丁进行防治,目前对于该虫害的防控方法主要依赖于人工防治、化学防治、生物防治和理化诱控技术进行防治。

人工防治主要分为:(1)击杀。在每年4月和7月中下旬,用锤、石块或斧头等工具对花椒树流胶处进行敲击,敲至流胶边缘为止,可杀死部分越冬和初孵幼虫。(2)合理管理花椒园。在10-12月对椒园进行深翻培土,按照花椒树的大小与结果量适度增施基肥,做好蓄水保墒工作,保证花椒树健壮生长。此外,定期修剪花椒树,清理腐烂和受害的枝条,集中焚烧干枯树皮和死亡花椒树,以减少幼虫数量并降低其他病虫害的感染风险。(3)捕捉成虫。在成虫活动期间组织人力捕杀害虫,减少田间成虫量,可有效降低其产卵量(薛耀宗,1989;乔智军等,2007)。人工防治较为费时费力,对于花椒种植面积较大的农户而言,该防治方法的人工成本较高,并且花椒窄吉丁隐蔽性较强,人工除虫效率较低,很难达到理想的防治效果。

化学防治则需要在幼虫活跃期,使用50%辛硫磷乳油与羊毛脂混合成膏状,涂抹于树干基部以杀灭幼虫(杜刚强,2023);在害虫高发期,使用氧化乐果等胃毒性农药对花椒的树冠进行喷施,可使成虫因取食毒叶而亡。同时,在7月底至8月中旬,使用适量的乐斯本或灭扫利溶液对树干进行喷洒,可有效消灭尚未蛀入木质部的初孵幼虫和虫卵(康克功等,2007;许新娟等,2020)。化学防治虽然省时省力,但是化学农药杀死成虫是在其羽化期后,此时害虫比较活跃,不得不增加施药剂量和次数,往往造成花椒成品农药残留超标,影响花椒的品质、出口和椒农收入。此外,化学杀虫剂的不合理使用还会引起严重的“3R”问题,即:农药残留(Residue)、有害生物再猖獗(Resurgence)和有害生物抗药性(Resistance)(朱建义等,2024)。因此,科学用药要求非常严格,在选药上不仅需要选择高效、低毒、低残留和环境友好型农药,在用药上还需要优化集成农药的轮换使用、交替使用、精准使用和安全使用等配套技术,加强农药抗药性监测与治理,普及规范使用农药的知识,严格遵守农药安全使用间隔期;通过合理使用农药,最大限度地降低农药使用造成的负面影响(周阳等,2013)。

生物防治技术则是借助生态天敌来控制害虫的数量,这一策略对环境友好且符合可持续

发展要求(张玲, 2022)。生物防治的治理目标是建立一个自我调节的生态系统, 使天敌与害虫之间达到生态平衡, 从而减少害虫带来的为害(张宇凡和王小艺, 2022)。花椒窄吉丁幼虫存在三种主要天敌: 花椒吉丁啮小蜂(*Tetrastichus zanthoxylumii*)、白僵菌和寄生蝇。其中, 花椒吉丁啮小蜂被认为是最具优势的天敌, 具备显著的人工繁殖和利用潜力(张伟和李孟楼, 2010a)。研究数据表明, 每个宿主幼虫体内能寄生的花椒吉丁啮小蜂数量在 1-32 头左右, 且这一数字与宿主幼虫体长之间存在正向线性关系, 这一发现对于制定有效的生物防治策略具有重要参考价值(张伟和李孟楼, 2010b)。生物防治除天敌和菌类防治外, 生物源农药和农用抗生素也是作物病虫害生物防治技术中的重要组成部分, 它们具有毒性低, 对植物没有危害, 不会出现环境污染与破坏(朱建义等, 2024)。已有研究表明, 使用 5% 除虫菊素乳油注干并配合刮皮涂抹木焦油的方式防治花椒窄吉丁虫和流胶病的效果最好, 综合防效可以达到 100%, 并且能够有效提升花椒品质, 保护生态环境(刘函如等, 2023)。

理化诱控技术是在掌握病虫害的发生规律基础上, 利用害虫趋性如趋光性、趋化性等诱杀成虫(朱建义等, 2024)。寄主植物挥发物作为昆虫的信息素来源之一, 在昆虫的寄主选择和行为定位中扮演者重要角色, 指引其寄主选择、取食、交配、产卵等多种行为(袁丽芳等, 2016; 王延来等, 2020)。已有研究表明, 花椒挥发性物质 α -水芹烯、月桂烯、(1R)-(+)-柠檬烯、乙酸芳樟酯对花椒窄吉丁具有引诱作用, 而(1R)-(+)- α -蒎烯、 β -蒎烯、 β -石竹烯对花椒窄吉丁具有趋避作用(袁丽芳等, 2016)。此外, 选取花椒窄吉丁后肠及粪便挥发性物质, 使用单体化合物或复配混合物, 对花椒窄吉丁进行室内行为趋向反应实验, 发现 1 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ 和 10 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ 浓度下的顺-9-十六烯醛、油酸、棕榈酸均对花椒窄吉丁具有引诱作用, 而在 100 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ 浓度下, 花椒窄吉丁对顺-9-十六烯醛表现出趋避反应。花椒窄吉丁雌虫对 1 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ 的顺-9-十六烯醛、油酸、棕榈酸复配物质有显著的引诱作用(刘绥鹏, 2017)。另外, 植物挥发性物质可促进昆虫信息素对昆虫的诱捕, α -水芹烯+月桂烯+(1R)-(+)-柠檬烯+顺-9-十六烯醛、乙酸芳樟酯+顺-9-十六烯醛、乙酸芳樟酯+ α -水芹烯+月桂烯+(1R)-(+)-柠檬烯+顺-9-十六烯醛的复配物可显著促进对花椒窄吉丁的诱捕(车显荣, 2018)。

1.6 花椒窄吉丁嗅觉研究概况

昆虫的化学通讯在昆虫选择栖息地、获得食物、趋利避害、传递讯息、群集以及繁殖等许多行为起到重要作用(Renou and Anton, 2020; Ai et al., 2022)。昆虫复杂的嗅觉系统可以探测到环境中无数不稳定的信号并作出反应(Schmidt and Benton, 2020)。为应对环境中复杂的“化学信号”变化, 昆虫的嗅觉系统逐步变得更加敏感且具有高度选择性, 同时需要多种蛋白的参与, 主要包括气味结合蛋白(odorant-binding proteins, OBPs)、信息素结合蛋白(Pheromone-binding proteins, PBPs)、化学感受蛋白(chemosensory proteins, CSPs)、气味受体蛋白(odorant receptors, ORs)、离子型受体(ionotropic receptors, IRs)、感受神经元膜蛋白(sensory neuron membrane proteins, SNMPs)、气味降解酶(odorant-degrading enzymes, ODEs)等(图 2)(Cassau1 and Krieger, 2020; Ha and Smith, 2022; Gao et al., 2023; Qi et al., 2024;)。

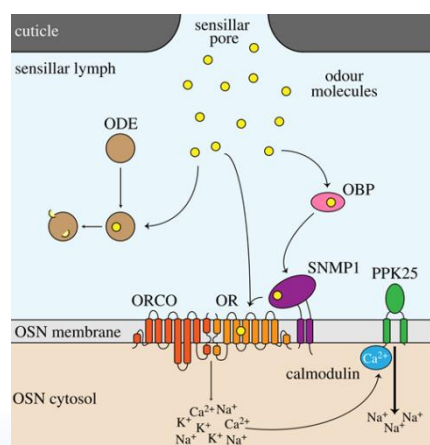


图 2 昆虫嗅觉信号传导示意图 (Schmidt and Benton, 2020)

花椒窄吉丁作为花椒的蛀干害虫之一, 其成虫是以椒叶为食的寡食性经济昆虫, 利用嗅觉寻找椒叶的挥发性物质进行定位, 并通过味觉试咬来判断是否适口来确定是否采食; 繁殖

交配期，雌成虫会释放性信息素，雄虫则通过性信息素的气味寻找雌虫进行交配（贾任航，2023）。因此，嗅觉器官对于花椒窄吉丁的个体生存和种群繁衍都具有至关重要的作用，也是目前利用植物源引诱剂进行害虫防控的重要研究内容之一。

1.6.1 花椒窄吉丁成虫触角感器超微结构观察

触角可以作为昆虫接受环境信号的“天线”，昆虫触角上分布有大量的感受器（Zhang et al., 2021）。昆虫感受器的研究技术主要有扫描电子显微镜和透射电子显微镜。扫描电子显微镜主要用于观察感受器的外部结构，透射电子显微镜主要研究感受器的内部结构特征。袁丽芳等（2016）通过扫描电子显微镜对花椒窄吉丁雌雄成虫触角进行观察，发现花椒窄吉丁成虫触角呈锯齿状，11节，分柄节、梗节和鞭节（9个亚节）。雌雄成虫共观察到6类17种感器：3种毛形感器、4种刺形感器、7种锥形感器、1种钟形感器、1种芽形感器和1种特殊感器，此外在雄虫触角上还发现 Böhm 氏鬃毛。花椒窄吉丁触角两侧面主要分布毛形感器，背腹面主要分布毛形感器和刺形感器。触角第IV-XI节端部有一个凹窝，凹窝内主要分布锥形感器，凹窝旁的凹陷中有一个锥形感器簇，但第X-XI节的锥形感器簇不明显。雌雄成虫的6类17种感器在分布位置上没有明显差异，但是雄虫触角第IV-XI节端部锥形感器的总数多于雌虫。

1.6.2 花椒窄吉丁触角转录组分析

巩雪芳（2019）成功构建了花椒窄吉丁触角转录组数据库，共获得 90,982 条 transcripts，与公共数据库比对共注释到 36,209 条 unigenes，其中 NR 数据库注释到的最多（41.62%）；GO 数据库注释，发现参与结合特性与催化活性的比例最大分别为 70.57% 和 45.51%；KEGG 数据库注释结果表明：7,427 条 unigenes 参与了 5 类代谢通路分支，其中信号转导最多，为 815 条。雌、雄成虫触角转录组中共筛选到 726 个差异表达基因，其中 459 个基因上调表达，267 个基因下调表达。GO 富集分析发现：差异基因显著富集于结合功能、催化活性、细胞进程、代谢过程、细胞组分、细胞器。KEGG 数据库中共有 472 条差异基因被注释，进行代谢通路的富集分析发现，共参与 165 条代谢途径中。

1.6.3 花椒窄吉丁嗅觉相关基因的筛选、鉴定及功能分析

巩雪芳等（2020）在构建的转录组数据库中成功筛选到 7 个 OBP、5 个 CSP、3 个 OR、5 个 IR、5 个 SNMP 嗅觉相关基因。其中 AzanOBP1、AzanOBP2、AzanOBP3、AzanOBP4、AzanOBP5 是具有 6 个保守的半胱氨酸位点，且第 2 个和第 3 个 Cys 之间间隔 3 个氨基酸，第 5 个和第 6 个 Cys 之间间隔 8 个氨基酸，鉴定其为典型的气味结合蛋白。AzanOBP6 序列中总共有 10 个半胱氨酸位点，猜测是非典型的气味结合蛋白（Atypical OBPs）。AzanOBP7 具有 4 个保守的半胱氨酸位点，初步鉴定为 DimerOBP 类。

目前已陆续成功克隆获得了花椒窄吉丁气味结合蛋白（AzanOBP3, AzanOBP4, AzanOBP5, AzanOBP7）和化学感受蛋白（AzanCSP3, AzanCSP4, AzanCSP7）基因。各基因的序列信息如表 1 所示。AzanOBPs 和 AzanCSPs 蛋白均为亲水蛋白，且在 N 端均具有信号肽结构，且除 AzanCSP3 外，其余嗅觉蛋白均不含跨膜结构（表 1）。此外，原核表达结果显示融合蛋白 AzanOBPs 和 AzanCSPs 在大肠杆菌中均有可溶性表达，且蛋白大小与预测蛋白分子质量大小一致（巩雪芳等, 2020；杨平等, 2020）。

通过构建系统发育树，发现 AzanOBPs 和 AzanCSPs 与苹果小吉丁（*Agrilus mali*）和白蜡窄吉丁（*Agrilus planipennis*）的嗅觉蛋白序列一致性较高。具体如下：AzanOBP3 与 AmalOBP2 和 AplaGOBP 的一致性最高，分别为 74.45% 和 76.92%，在进化关系上更加同源（巩雪芳等, 2020）。AzanOBP4 氨基酸序列与 AmalOBP3 氨基酸序列一致性最高为 83.57%，两者在系统发育树中以 99% 的置信度聚为一支（郭莉等, 2021a）。AzanOBP5 氨基酸序列与 AmalOBP5 的氨基酸序列一致性最高（郭莉等, 2023）。AzanOBP7 氨基酸序列与 AmalOBP11 的氨基酸序列一致性最高，为 97.4%（Gao et al., 2023）。AzanCSP3 与其他鞘翅目昆虫的 CSP 序列同源性较高，其中与 AmalCSP4、AplaCSP3 以 100% 置信度聚为一支（杨平等, 2020）。AzanCSP4 与苹果小吉丁 AmalCSP6 聚为一支（Qi et al., 2024）。AzanCSP7 和苹果小吉丁 AmalCSP8 紧密聚为一支，置信度 100%（高晓进等, 2023）。

通过 qPCR 检测了花椒窄吉丁 AzanOBPs 和 AzanCSPs 在雌、雄成虫的头、胸、腹、足、翅的表达情况。组织表达谱表明：AzanOBPs 和 AzanCSPs 在雌、雄成虫的不同组织中都有表达，AzanOBP3 在雄成虫足中的表达量最高（巩雪芳等, 2020）。AzanOBP4 在雌性成虫的足部表达量最高（郭莉等, 2021a）。AzanOBP5 在成虫腹部的表达量最高（郭莉等, 2023）。

AzanOBP7 在雌成虫腹部高表达，在雄虫胸部高表达（Gao et al., 2023）。AzanCSP4 在雌、雄成虫在头部的表达量高于其他组织，在同一组织中，AzanCSP4 在雌虫的表达量高于雄虫（Qi et al., 2024）。AzanCSP7 在雄虫和雌虫中的表达量均是在头部最高，且在雌虫头部和足部的表达量极显著高于雄虫（高晓进等, 2023）。以上结果均表明花椒窄吉丁 AzanOBPs 和 AzanCSPs 除参与嗅觉识别过程外，还可能具有其他生理功能（郭莉等, 2023）。

表 1 已鉴定的 *AzanOBPs* 和 *AzanCSPs* 基因序列分析

基因名称	GenBank No.	cDNA 长度 (bp)	OR F	5'UT R	3'UT R	编码 aa 数	预测蛋白质分子量 (Kda)	理论等电点 (pI)	亲/疏水性	信号肽预测	跨膜结构预测	参考文献
<i>AzanOBP3</i>	MT318832	614	414	35	142	137	16.038	4.79	亲水蛋白	N 端含有信号肽 (1-29)	不含有	巩雪芳, 2019
<i>AzanOBP4</i>	MT318833	691	423	182	89	140	15.96	8.13	亲水蛋白	N 端含有信号肽 (1-19)	不含有	郭莉, 2021
<i>AzanOBP5</i>	MT318834	740	453	172	114	150	17.27	4.95	亲水蛋白	N 端含有信号肽 (1-20)	不含有	郭莉, 2021
<i>AzanOBP7</i>	MT318836	921	450	283	179	149	17.176	4.85	亲水蛋白	N 端含有信号肽 (1-18)	不含有	郭莉, 2021
<i>AzanCSP3</i>	MF770644	864	396	267	202	132	15.038	9.16	亲水蛋白	N 端含有信号肽 (1-20)	跨膜螺旋区存在于 4~22 位 aa 之间	杨平, 2020.
<i>AzanCSP4</i>	MT291821	403	366	65	83	121	13.96	9.49	亲水蛋白	N 端含有信号肽 (1-15)	不含有	高晓进, 2023
<i>AzanCSP7</i>	ON409462	400	333	17	61	110	12.57	9.5	亲水蛋白	N 端含有信号肽 (1-19)	不含有	高晓进, 2023

使用 RaptorX 构建 AzanOBPs 和 AzanCSPs 三维模型后，通过 AutoDock Vina 与 46 种寄主挥发物配体进行分子对接，结果表明：AzanOBPs 和 AzanCSPs 与 46 种花椒气味挥发物主要以氢键、疏水作用和范德华力相结合，其中 13 种链状配体与 AzanOBP3 的结合能力总体上弱于 33 种环状配体，链状配体中的芳樟醇和环状配体中的萆澄茄油烯与 AzanOBP3 表现出较好的结合能力，自由结合能分别为 -5.2 kJ/mol 和 -6.6 kJ/mol（郭莉等, 2021b）。AzanOBP4 与 14 种寄主挥发物主要以氢键、疏水作用和范德华力相结合，发现 4 种环状烯类寄主挥发物（萆草烯、 β -石竹烯、萆澄茄油烯和 ζ -依兰油烯）与 AzanOBP4 的结合能力较好（郭莉等, 2021a）。AzanCSP7 与 6 种配体（可巴烯、 β -石竹烯、 β -榄香烯、右旋大根香叶烯、萆澄茄油烯和萆草烯）结合力较好（高晓进等, 2023）。上述结果均表明表明花椒窄吉丁 AzanOBPs 和 AzanCSPs 能与寄主植物花椒的多种挥发性物质结合，认为 AzanOBPs 和 AzanCSPs 在花椒窄吉丁寻找寄主与取食行为中发挥着重要作用。

2 小结与展望

花椒窄吉丁是花椒树上重大害虫，该虫具有隐蔽的取食行为，会使寄主树花椒的受害症状延迟，自其暴发成灾以来，国内很多学者都对其进行了研究，人们对其形态特征、生活史及综合防治也有了一定的了解，但是目前还缺乏有效的防治手段。目前对花椒窄吉丁嗅觉系统研究大部分集中于嗅觉行为实验及嗅觉相关蛋白的克隆与鉴定，同时，也筛选出一些可以引起 EAG 触角活性的化学信息素和寄主挥发物，但仍然有很多未知的领域等待人们去探索。例如其嗅觉识别通路相关蛋白的功能研究还不够完善，仍缺乏通过 RNA 干扰实验验证嗅觉基因的功能，更是缺少嗅觉表达减少害虫数量的尝试。除此之外，对于已经鉴定到的嗅觉相关蛋白，可进一步研究不同蛋白之间的相互作用，或尝试利用分子手段阻断蛋白合成来达到干扰其交配的目的。雌性 EAG 释放的信息素和寄主挥发物的鉴定虽已被用于制作引诱剂，但是这两类物质共同作为引诱剂是否为简单的协同增效的作用还有待于进一步的研究，如果

能最大限度的增大它们混合后对 EAG 的吸引, 再将其与粘虫板结合, 这将大大增加诱捕器的诱捕效率。此外, 植食性昆虫在寻找寄主、取食、栖息的过程中视觉、嗅觉、味觉和触觉都发挥着不同的作用。昆虫利用感觉器官完成各种生命活动的过程十分复杂, 各种感觉系统之间还可能相互关联协作, 单独研究某一种感觉器官对其取食、交配、产卵等生命活动的影响具有一定的局限性, 因此探索嗅觉和其他感觉系统之间的相互作用机制尤为重要。鉴于嗅觉在花椒窄吉丁寄主定位过程中的重要作用, 在今后研究中, 我们可以进一步探索花椒窄吉丁嗅觉在其各项生命活动中的交互作用。通过行为观测实验和分子生物学实验共同验证各嗅觉蛋白对昆虫行为的调节作用。这些研究有助于阐明花椒窄吉丁虫交配和寄主定位机制, 并进一步开发该害虫高效、新型环保的防治技术。

参 考 文 献

- [1]. Ai S P, Zhang Y H, Chen Y Y, Zhang T, Zhong G H, Yi X. 2022. Insect-microorganism interaction has implicates on insect olfactory systems. *Insects*, 13, 1094.
- [2]. Cassau I S, Krieger J. 2020. The role of SNMPs in insect olfaction. *Cell and Tissue Research*, 383:21-33.
- [3]. Fei X T, Shi Q Q, Qi Y C, Wang S J, Lei Y, Hu H C, Liu Y L, Yang T X, Wei A Z. 2021. *ZbAGL11*, a class D MADS-box transcription factor of *Zanthoxylum bungeanum*, is involved in sporophytic apomixis. *Horticulture Research*, 8(1): 1-13.
- [4]. Gao X J, Guo L, Jiang N, Qi Y, Jin Q Y, Xie S A, Lv S J. 2023. Cloning and Expression Analysis of *AzanOBP7*, a Minus-C Odorant-Binding Protein Gene, from *Agrilus zanthoxylumi* (Coleoptera: Buprestidae). *Journal of Entomological Science*, 58(04): 447-459.
- [5]. Guo B, Hao E H, Qiao H L, Wang J Z, Wu W W, Zhou J J, Lu P F. 2021. Antennal transcriptome analysis of olfactory genes and characterizations of odorant binding proteins in two woodwasps, *Sirex noctilio* and *Sirex nitobei* (Hymenoptera: Siricidae). *BMC Genomics*, 22:172.
- [6]. Ha T S, Smith D. P. 2022. Recent Insights into Insect Olfactory Receptors and Odorant-Binding Proteins. *Insects*, 13(10): 926.
- [7]. Qi Y, Gao X J, Jiang N, Guo L, Xie S A, Lv S J, Cheng H G. 2024. Cloning and Expression Analysis of Chemosensory Protein *AzanCSP4* from *Agrilus Zanthoxylumi* (Coleoptera: Buprestidae). *Journal of Entomological Science*, 59(03): 247-257.
- [8]. Renou M, Anton S. 2020. Insect olfactory communication in a complex and changing world. *Current Opinion in Insect Science*, 42:1-7.
- [9]. Schmidt H R, Benton R. 2020. Molecular mechanisms of olfactory detection in insects: beyond receptors. *Open Biology*. 10: 200252.
- [10]. Sun L W, Yu D M, Wu Z C, Wang C, Yu L, Wei A Z, Wang D M. 2019. Comparative transcriptome analysis and expression of genes reveal the biosynthesis and accumulation patterns of key flavonoids in different varieties of *Zanthoxylum bungeanum* leaves. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(48): 13258-13268.
- [11]. Xu S N, Yu L, Hou Y P, Huang B, Wang H, Li D W, Wang D M. 2023. Chemical composition, chemotypic characterization, and histochemical localization of volatile components in different cultivars of *Zanthoxylum bungeanum* Maxim. Leaves. *Journal of Food Science*, 88(04): 1215-1780.
- [12]. Yang L C, Li R, Tan J, Jiang Z T. 2013. Polyphenolics composition of the leaves of *Zanthoxylum bungeanum* Maxim. grown in Hebei, China, and their radical scavenging activities. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(08): 1772-1778.
- [13]. Zhang F, Chen J, Ma M, Lu P F, Liu S, Guo K, Xu R, Qiao H L, Xu C Q. 2021. Morphology and distribution of antennal sensilla in the gall midge *Gephyraulus lycantha* (Diptera: Cecidomyiidae). *Micron*, 145: 103061.
- [14]. 曹发岭, 许国辉. 2000. 宜川县花椒主要病虫害调查与防治对策. *陕西林业科技*, 28(02): 40-43. (Cao F L, Xu G H. 2000. Investigation and control measures of main pests and diseases of *Zanthoxylum bungeanum* in Yichuan County. *Shaanxi Forest Science and Technology*, 28(02): 40-43. [in Chinese])
- [15]. 曹晶, 曹仲根, 王海洋. 2021. 安康市花椒主要病虫害调查及防治研究. *现代农业科技*, 50(22): 74-76. (Cao J, Cao Z G, Wang H Z. 2021. Investigation and control of major diseases and insect pests of *Zanthoxylum bungeanum* in Ankang City. *Modern Agricultural Science and Technology*, 50(22): 74-76. [in Chinese])
- [16]. 曹业凡, 汪来发, 王曦苗, 徐志伦, 李央, 姚玲. 2019. 九叶青花椒根结线虫病的病原鉴定. *植物保护*, 45(05): 242-246. (Cao Y F, Wang L F, Wang X Z, Xu Z L, Li Y, Yao L. 2019. Identification of root-knot nematode on *Zanthoxylum armatum* var. novemfolius. *Plant Protection*, 45(05): 242-246. [in Chinese])
- [17]. 曾燕妮. 2015. 陕西省富平县花椒窄吉丁虫的防治技术推广. *北京农业*, 35(20): 73-74. (Zeng Y N. 2015. Popularization of control technology of *Agrilus zanthoxylumi* in Fuping county, Shaanxi province *Beijing Agriculture*, 35(20): 73-74. [in Chinese])
- [18]. 车显荣. 2018. 花椒园昆虫种群群落结构及田间诱捕效果研究. 硕士学位论文. 陕西杨凌: 西北农林科技大学. (Che X R. 2018. Study on Insect Community Structure and Field Trapping Effect in *Zanthoxylum bungeanum* Garden. Master dissertation. Yangling Shaanxi: Northwest A&F University. [in Chinese])
- [19]. 陈在辉. 2022. 我国花椒产业发展现状及未来发展前景. *现代园艺*, 45(08): 16-18. (Chen Z H. 2022. Development status and future development prospect of Chinese prickly ash industry. *Modern horticulture*, 45(08): 16-18. [in Chinese])
- [20]. 党国刚, 郭军成, 孙杜闯, 庄丽娟. 2017. 渭南市花椒窄吉丁虫危害风险分析. *防护林科技*, 35(04): 59-61. (Dang G G, Guo J C, Sun D C, Zhuang L J. 2017. Hazard risk analysis of *Agrilus zanthoxylumi* in Weinan City. *Protection Forest Science and Technology*, 35(04): 59-61. [in Chinese])
- [21]. 杜刚强. 2023. 泾阳县花椒高产栽培管理技术. *现代园艺*, 46(14): 34-36. (Du G Q. 2023. High-yield cultivation and management technology of *Zanthoxylum bungeanum* in Jingyang County. *Modern horticulture*, 46(14): 34-36. [in Chinese])
- [22]. 高焕婷, 张国龙. 2007. 花椒窄吉丁虫的生物学特性及其综合防治措施. *陕西农业科学*, 53(02): 183-184. (Gao H L, Zhang G L. 2007. Biological characteristics and comprehensive control measures of *Agrilus zanthoxylumi*. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 53(02): 183-184. [in Chinese])
- [23]. 高晓进, 郭莉, 陈迪, 贾任航, 张泽腾, 谢寿安, 吕淑杰. 2023. 花椒窄吉丁化学感受蛋白 *AzanCSP7* 的三维模型预测及其与寄主挥发物的分子对接. *农业生物技术学报*, 31(06): 1238-1251. (Gao X J, Guo L, Chen D, Jia R H, Zhang Z T, Xie S A, Lv S J. 2023. Three-Dimensional Model Prediction and Molecular Docking with Host Volatiles of Chemosensory Protein *AzanCSP7* in Jewel Beetle (*Agrilus zanthoxylumi*). *Journal of Agricultural Biotechnology*, 31(06): 1238-1251. [in Chinese])
- [24]. 高晓进. 2023. 花椒窄吉丁化学感受蛋白的基因克隆及其结合特性分析. 硕士学位论文. 陕西杨凌: 西北农林科技大学. (Gao X J. 2023. Gene cloning and binding characters analysis of chemosensory proteins from *Agrilus zanthoxylumi*. Master dissertation. Yangling Shaanxi: Northwest A&F University. [in Chinese])
- [25]. 巩雪芳, 杨平, 王延来, 郭莉, 陈迪, 谢寿安, 吕淑杰. 2020. 花椒窄吉丁气味结合蛋白基因 *AzanOBP3* 的克隆、原核表达及组织表达谱分析. *昆虫学报*, 63(04): 390-400. (Gong X F, Yang P, Wang Y L, Guo L, Chen D, Xie S A, Lv S J. 2020. Cloning, prokaryotic expression and tissue expression profiling of odorant binding protein gene *AzanOBP3* from *Agrilus zanthoxylumi* (Coleoptera: Buprestidae). *Acta entomologica sinica*, 63(04): 390-400. [in Chinese])
- [26]. 巩雪芳. 2019. 花椒窄吉丁气味结合蛋白的基因克隆和原核表达. 硕士学位论文. 陕西杨凌: 西北农林科技大学. (Gong X F. 2019.

- Molecular cloning, Prokaryotic expression of odorant binding protein in *Agrilus zanthoxylumi*. Master dissertation. Yangling Shaanxi: Northwest A & F University. [in Chinese]
- [27]. 郭莉, 陈迪, 高晓进, 贾任航, 张泽腾, 谢寿安, 吕淑杰, 陈正斌. 2021a. 花椒窄吉丁气味结合蛋白 *AzanOBP4* 基因克隆及其与寄主挥发物分子对接. 农业生物技术学报, 29(07): 1364-1377. (Guo L, Chen D, Gao X J, Jia R H, Zhang Z T, Xie S A, Lv S J, Cheng Z B. 2021. Molecular docking of host volatiles and gene cloning of odorant binding protein *AzanOBP4* from *Agrilus zanthoxylumi* (Coleoptera: Buprestidae). Journal of Agricultural Biotechnology, 29(7):1364-1377. [in Chinese])
 - [28]. 郭莉, 陈迪, 贾任航, 高晓进, 张泽腾, 谢寿安, 吕淑杰. 2023. 花椒窄吉丁气味结合蛋白 *AzanOBP5* 的克隆与表达. 植物保护学报, 50(1):81-90. (Guo L, Chen D, Jia R H, Gao X J, Zhang Z T, Xie S A, Lv S J. 2023. Cloning and Expression Analysis of odorant binding protein *AzanOBP5* from *Agrilus zanthoxylumi* (Coleoptera: Buprestidae). Journal of Plant Protection, 50(01):81-90. [in Chinese])
 - [29]. 郭莉, 谢寿安, 杨平, 巩雪芳, 陈迪, 吕淑杰. 2021b. 花椒窄吉丁气味结合蛋白 *AzanOBP3* 与其寄主挥发物的分子对接. 植物保护学报, 48(02): 376-387. (Guo L, Xie S A, Yang P, Gong X F, Chen D, Lv S J. 2021. Molecular docking of host volatiles and odorant binding protein *AzanOBP3* from *Agrilus zanthoxylumi* (Coleoptera: Buprestidae). Journal of Plant Protection, 48(02):376-387. [in Chinese])
 - [30]. 郭莉. 2021. 花椒窄吉丁气味结合蛋白的结合特性分析. 硕士学位论文. 陕西杨凌: 西北农林科技大学. (Guo L. 2021. Binding Characters Analysis of Odorant Binding Proteins from *Agrilus zanthoxylumi*. Master dissertation. Yangling Shaanxi: Northwest A & F University. [in Chinese])
 - [31]. 吉波, 张耀华, 银航, 张云霞, 孙小媛, 段春娟, 薛婷. 2020. 花椒病虫害生物防治的研究综述. 陕西农业科学, 66(10): 72-75. (Ji B, Zhang Y H, Yin H, Zhang Y X, Sun X Y, Duan C J, Xue T. 2020. Research review on biological control of pest and disease in *Zanthoxylum bungeanum*. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 66(10): 72-75. [in Chinese])
 - [32]. 贾任航. 2023. 花椒窄吉丁的交配行为观察及信息素引诱剂的筛选与初试. 硕士学位论文. 陕西杨凌: 西北农林科技大学. (Jia R H. 2023. Observations on the mating behavior of *Agrilus zanthoxylumi* and screening and preliminary test of pheromone attractants. Master dissertation. Yangling Shaanxi: Northwest A & F University. [in Chinese])
 - [33]. 康克功, 王永平, 强磊, 石和芹, 陈辉. 2007. 花椒窄吉丁化学防治研究. 西北林学院学报, 24(06): 105-107. (Kang K G, Wang Y P, Qiang L, Shi H Q, Chen H. 2007. Control technology of *Agrilus zanthoxylumi*. Journal of Northwest Forestry University, 24(05): 40-40. [in Chinese])
 - [34]. 李孟楼, 李宗明, 焦爱叶. 1990. 花椒窄吉丁的危害规律及其分布型. 07(01): 37-41. (Li M L, Li Z M, Jiao A Y. 1990. Spatial Distribution pattern and Damage Character of Prigkly ash Stem Girdler. Journal of Northwest Forestry University. 07(01): 37-41. [in Chinese])
 - [35]. 李培琴, 阮钊, 焦嘉卉, 孙孟娇, 丁俊园, 唐光辉. 2023. 花椒黑胫病的病原鉴定与杀菌剂筛选. 经济林研究, 41(03): 150-158. (Li P Q, Ruan Z, Jiao J H, Sun M J, Ding J Y, Tang G H. 2023. Pathogen identification and fungicide screening of *Zanthoxylum bungeanum* black shank. Non-wood Forest Research, 41(03): 150-158. [in Chinese])
 - [36]. 李亚南, 崔传坚, 陈江琳, 运晶, 金龙, 侯如燕. 2022. 基于挥发性风味物质的花椒产地溯源技术研究. 食品工业科技, 43(02): 293-303. (Li Y N, Cui C J, Chen J L, Yun J, Jin L, Hou R Y. 2022. Tracing the Geographical Origin of *Zanthoxylum bungeanum* by Volatile Compounds. Science and Technology of Food Industry, 43(02): 293-303. [in Chinese])
 - [37]. 刘峰, 杨文香, 张娜, 赵京献, 郭伟珍, 张汀, 刘大群. 2013. 花椒枯穗病病原鉴定. 植物病理学报, 43(03): 310-313. (Liu F, Yang W X, Zhang N, Zhao J X, Guo W Z, Zhang T, Liu D Q. 2013. Identification of the pathogen of *Zanthoxylum bungeanum* ear blight. Acta Phytopathologica Sinica, 43(03): 310-313. [in Chinese])
 - [38]. 刘函如, 王宇佳, 李来福, 周一万, 马志卿, 雷鹏. 2023. 生物农药防治花椒窄吉丁虫和流胶病的使用技术筛选与评价. 中国生物防治学报, 39(06): 1482-1487. (Liu H R, Wang Y J, Li L F, Zhou Y W, Ma Z Q, Lei P. 2023. Screening and Evaluation of Application Techniques of Biopesticides for Controlling *Agrilus zanthoxylumi* and Gummosis of Pepper. Chinese Journal of Biological Control, 39(06): 1482-1487. [in Chinese])
 - [39]. 刘三斤, 杜雯艳, 辛国, 郑小平. 2024. 武都花椒主要病虫害发生规律及防治策略. 特种经济动植物, 27(03): 95-97. (Liu S J, Du W Y, Xin G, Zheng X P. 2024. Occurrence regularity and control strategy of main diseases and insect pests of *Zanthoxylum bungeanum* in Wudu district. Special Economic Animals and Plants, 27(03): 95-97. [in Chinese])
 - [40]. 刘绥鹏. 2017. 花椒窄吉丁后肠、粪便挥发性物质分析及其生理活性研究. 硕士学位论文. 陕西杨凌: 西北农林科技大学. (Liu S P. 2017. Analysis and biological activities of volatile substances in hindgut and feces of *Agrilus zanthoxylumi*. Master dissertation. Yangling Shaanxi: Northwest A & F University. [in Chinese])
 - [41]. 卢凯洁, 张升恒, 魏云林, 伏松平, 鲁爱军. 2016. 天水市花椒病虫害调查. 甘肃农业科技, 54(03): 13-16. (Lu K J, Zhang S H, Wei Y L, Fu S P, Lu A J. 2016. Investigation of *Zanthoxylum bungeanum*'s pest and disease in Tianshui City. Gansu Agricultural Science and Technology, 54(03): 13-16. [in Chinese])
 - [42]. 孟玲, 李久平, 穆娟, 王建国. 2015. 花椒窄吉丁虫实用防治技术. 43(06): 97-98. (Meng L, Li J L, Mu J, Wang J G. 2015. Practical Techniques to Control *Agrilus zanthoxylumi*. 43(06): 97-98. [in Chinese])
 - [43]. 乔旭. 2010. 影响花椒树寿命的主要因素及综合治理措施. 经济林研究, 28(02): 122-125. (Qiao X. 2010. Main factors affecting lifetime and integrated management measures in *Zanthoxylum*. Non-wood Forest Research. 28(02): 122-125. [in Chinese])
 - [44]. 乔智军, 倪香利, 薛阿梅, 乔社锋. 2007. 花椒窄吉丁的防治技术. 陕西林业, 60(05): 40-40. (Qiao Z J, Ni X L, Xue A M, Qiao S F. 2007. ontrol technology of *Agrilus zanthoxylumi*. Forestry of Shaanxi, 60(05): 40-40. [in Chinese])
 - [45]. 权丽君. 2016. 花椒窄吉丁的发生及其防治措施. 陕西农业科学, 62(12):116-116. (Quan L J. 2016. Occurrence and prevention of *Agrilus zanthoxylumi*. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 62(12):116-116. [in Chinese])
 - [46]. 王延来, 谢寿安, 赖青, 巩雪芳, 杨平, 吕淑杰, 李冬. 2020. 花椒窄吉丁对寄主果实挥发物的触角电位及行为反应. 西北林学院学报, 35(1): 150-157. (Wang Y L, Xie S A, Lai Q, Gong X F, Yang P, Lv S J, Li D. 2020. Electroantennogram and Behavioral Responses of *Agrilus zanthoxylumi* to Volatiles from *Zanthoxylum bungeanum* fruit. Journal of Northwest Forestry University, 35(1): 150-157. [in Chinese])
 - [47]. 王燕, 李仁娜, 刘雪涛, 王娜. 2012. 韩城花椒窄吉丁虫的发生及防治. 陕西林业科技, 40(01): 76-77. (Wang Y, Li R N, Liu X T, Wang N. 2012. The Occurrence and Control of *Agrilus zanthoxylumi* in Hancheng. Shaanxi Forest Science and Technology, 40(01): 76-77. [in Chinese])
 - [48]. 吴海. 2006. 花椒窄吉丁的生物学特性及防治. 昆虫知识, 43(02): 236-239. (Wu H. 2006. Bionomics and control of *Agrilus zanthoxylumi*. Chinese Bulletin of Entomology, 43(02): 236-239. [in Chinese])
 - [49]. 吴跃开. 2023. 花椒锈病研究现状、存在问题及展望. 安徽农学通报, 29(08): 130-133. (Wu Y K. 2023. Research status, existing problems and prospects of *Zanthoxylum* rust disease. Anhui Agricultural Science Bulletin, 29(08): 130-133. [in Chinese])
 - [50]. 许新娟, 张聪珍, 冯莉, 田斌茹. 2020. 花椒窄吉丁虫发生规律与综合防治. 西北园艺, 33(02): 40-41. (Xu X J, Zhang C Z, Feng L, Tian B R. 2020. Occurrence rule and comprehensive control of *Agrilus zanthoxylumi*. Northwest Horticulture, 33(02): 40-41. [in Chinese])
 - [51]. 薛耀宗. 1989. 花椒窄吉丁虫防治技术. 山西果树, 10(01): 33-34. (Xue Y Z. 1989. Control technology of *Agrilus zanthoxylumi*. Journal of Fruit Resources, 10(01): 33-34. [in Chinese])
 - [52]. 杨平, 巩雪芳, 陈迪, 郭莉, 王延来, 吕淑杰, 谢寿安. 2020. 花椒窄吉丁化学感受蛋白 *AzanCSP3* 的 cDNA 克隆及原核表达. 农业生物技术学报, 28(02): 302-312. (Yang P, Gong X F, Chen D, Guo L, Wang Y L, Lv S J, Xie S A. 2020. Cloning and prokaryotic

- Expression of Chemosensory Protein *AzanCSP3* from *Agrilus zanthoxylumi* (Coleoptera: Buprestidae). Journal of Agricultural Biotechnology, 28(2):302-312. [in Chinese])
- [53]. 杨平. 2020. 基于转录组测序的花椒窄吉丁化学感受蛋白的研究. 硕士学位论文. 陕西杨凌: 西北农林科技大学. (Yang P. 2020. Analysis of Chemosensory Proteins in *Agrilus zanthoxylumi* by Transcriptome Sequencing. Master dissertation. Yangling Shaanxi: Northwest A & F University. [in Chinese])
- [54]. 银航, 窦雪绒, 张云霞, 王秀玲. 2018. 花椒属植物育种的研究进展与发展趋势. 陕西农业科学, 64(09): 93-95. (Yin H, Dou X R, Zhang Y X, Wang X L. 2018. Advance of *Zanthoxylum* Breeding and Its Trends. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 64(09): 93-95. [in Chinese])
- [55]. 袁丽芳, 谢寿安, 刘绥鹏, 吕淑杰, 郭新荣, 宋晓斌. 2016. 花椒窄吉丁对寄主挥发物的触角电位及行为反应. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 45(02): 111-120. (Yuan L F, Xie S A, Liu S P, Lv S J, Guo X R, Song X B. 2016. Electroantennogram and behavioural responses of *Agrilus zanthoxylumi* to volatiles from *Zanthoxylum bungeanum*. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition), 45(02): 111-120. [in Chinese])
- [56]. 张玲. 2022. 生物防治技术在花椒病虫害防治中的应用分析. 种子科技, 40(21): 109-111. (Zhang L. 2022. Application of biological control technology in pest control of *Zanthoxylum bungeanum*. Seed Science & Technology, 40(21): 109-111. [in Chinese])
- [57]. 张伟, 李孟楼. 2010a. 花椒吉丁啮小蜂生物学特性初步研究. 西北林学院学报, 25(01): 107-110. (Zhang W, Li M L. 2010a. Preliminary Study of the Biological Characteristics of *Tetrastichus zanthoxylumii*. Journal of Northwest Forestry University, 25(01): 107-110. [in Chinese])
- [58]. 张伟, 李孟楼. 2010b. 花椒吉丁啮小蜂的活动规律及产卵行为. 南京林业大学学报(自然科学版), 34(1):132-134. (Zhang W, Li M L. 2010b. The activity rhythm and oviposition behavior of *Tetrastichus zanthoxylumii*. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition), 34(1):132-134. [in Chinese])
- [59]. 张晓明, 陈国华, 李强. 2009. 我国花椒害虫研究进展. 昆虫知识, 46(04): 532-537. (Zhang X M, Chen G H, Li Q. 2009. Research advance in insect pests on *Zanthoxylum bungeanum* in China. Chinese Bulletin of Entomology, 46(04): 532-537. [in Chinese])
- [60]. 张宇凡, 王小艺. 2022. 林木蛀干害虫防治技术研究进展. 陆地生态系统与保护学报, 02(03): 47-64. (Zhang Y F, Wang X Y. 2022. Advances in Control Techniques of Wood Boring Insect Pests. Terrestrial Ecosystem and Conservation, 02(03): 47-64. [in Chinese])
- [61]. 赵灵爱. 1999. 花椒窄吉丁的综合防治. 中国农村科技, 06(12): 14-14. (Zhao L A. 1999. Comprehensive control of *Agrilus zanthoxylumi*. China Rural Science & Technology, 06(12): 14-14. [in Chinese])
- [62]. 周阳, 赵中华, 杨普云. 2013. 以绿色防控促进生态文明建设. 中国植保导刊, 33(11): 75-78. (Zhou Y, Zhao Z H, Yang P Y. 2013. Promoting ecological progress through green prevention and control. China Plant Protection, 33(11): 75-78. [in Chinese])
- [63]. 朱建义, 胡容平, 徐湘婷, 范中菡, 陈松, 陈庆华. 2024. 花椒病虫害绿色防控技术研究进展. 中南农业科技, 45(01): 241-244. (Zhu J Y, Hu R P, Xu X T, Fan Z H, Chen S, Chen Q H. 2024. Research progress on green control technology of *Zanthoxylum bungeanum*'s pest and disease. South-Central Agricultural Science and Technology, 45(01): 241-244. [in Chinese])
- [64]. 庄丽娟. 2013. 花椒树病虫害的防治对策. 现代园艺, 17(33): 89-89. (Zhuang L J. 2013. Control measures of diseases and insect pests in *Zanthoxylum bungeanum* Maxim. Modern horticulture, 17(33): 89-89. [in Chinese])