



# 土沉香重大害虫黄野螟生物学与综合防控 技术研究进展

杜澄举<sup>1</sup>, 李广升<sup>1</sup>, 李鸿立<sup>1</sup>, 李洁<sup>1</sup>, 杨欣亚<sup>1</sup>,  
李晓媚<sup>1</sup>, 邱华龙<sup>2\*</sup>, 王偲<sup>1\*</sup>

(1. 华南农业大学林学与风景园林学院, 广州 510642; 2. 广东省林业科学研究院, 广州 510520)

**摘要:** 土沉香 *Aquilaria sinensis* 是我国重要的沉香基源植物, 具有极高的经济和文化价值。黄野螟 *Heortia vitessoides* 是土沉香的重大食叶害虫, 其幼虫具有聚集行为, 常形成数百头集群大量取食土沉香叶片, 导致树势衰弱甚至死亡。目前, 化学杀虫剂仍是防控黄野螟的主要方法, 但可能导致农药残留问题, 降低沉香的品质和价格。近年来, 黄野螟的分子生物学、化学生态和综合防控技术获得了极大的关注。分子生物学方面, 黄野螟的高质量基因组已公布, 一系列与昆虫发育、环境适应以及抗性相关的功能基因被鉴定, 为基于核酸的生物农药的研发提供了理论基础。此外, 研究表明土沉香和花香挥发物对黄野螟成虫具有显著的电生理活性和引诱作用。然而, 黄野螟成虫性信息素的具体成分仍未成功解析。综合防控技术方面, 有较多研究探索通过筛选抗性土沉香品系、利用天敌昆虫和病原微生物等方法防控黄野螟。未来应继续深入研究黄野螟基础生物学并完善黄野螟绿色防控技术体系。

**关键词:** 土沉香; 中草药; 农药残留; 绿色防控; 鳞翅目害虫

中图分类号: Q968.1;

文献标识码: A

## Research progress on the biology and integrated control techniques of *Heortia vitessoides*, the major pest of *Aquilaria sinensis*

DU Cheng-Ju<sup>1</sup>, LI Guang-Sheng<sup>1</sup>, LI Hong-Li<sup>1</sup>, LI Jie<sup>1</sup>, YANG Xin-Ya<sup>1</sup>, LI Xiao-Mei<sup>1</sup>, QIU Hua-Long<sup>2\*</sup>, WANG Cai<sup>1\*</sup> (1. College of Forestry and Landscape Architecture, South China

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金 (2022A1515010080)

作者简介: 杜澄举, 男, 博士研究生, 研究方向为林业有害生物综合防治, E-mail: 463957526@qq.com

\*通讯作者 Author for correspondence: 王偲, 男, 博士, 教授, 主要研究方向为昆虫行为学与林业有害生物综合防治, E-mail: wangcai@scau.edu.cn; 邱华龙, 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为昆虫行为与化学生态学, E-mail: qiuhualong2008@163.com

收稿日期 Received: 2024-09-23; 修回日期 Revision received: 2024-11-14; 接受日期 Accepted: 2024-11-15

Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China)

**Abstract:** *Aquilaria sinensis* is an important source plant of agarwood in China, with significantly high economic and cultural values. *Heortia vitessoides* is the major leaf-eating pest of *A. sinensis*. The larvae of *H. vitessoides* are gregarious, usually forming large cohorts containing dozens or hundreds of individuals that consume large amounts of leaves and leading to the weak or even death of *A. sinensis*. Currently, chemical insecticides are the primary method for controlling *H. vitessoides*. However, this approach can lead to pesticide residue issues, thereby reducing the quality and price of agarwood. In recent years, the molecular biology, chemical ecology, and eco-friendly management technology of *H. vitessoides* have received increasing attention. A high-quality genome of *H. vitessoides* has been published, and several functional genes related to development, stress response, and resistance have been identified, providing a theoretical basis for the development of RNA-based biopesticides. In addition, various volatile compounds from *A. sinensis* and floral scents show electrophysiological activity and attractive effects on *H. vitessoides* adults. However, the specific components of the sex pheromones of *H. vitessoides* adults have not yet been identified. Many efforts have been made to develop alternative control methods, such as screening resistant varieties of *A. sinensis* and utilizing predatory insects and entomopathogenic microorganisms against *H. vitessoides*. Future research is needed to deepen the understanding of the basic biology of *H. vitessoides* and improve the green pest management technology system to effectively control this pest.

**Key words:** *Aquilaria sinensis*; traditional chinese medicine; pesticide residue; eco-friendly pest management; lepidopteran pests

沉香是产自中国及南亚和东南亚等国家的名贵传统药材和天然香料，在传统医药、香薰日化、文化和宗教等领域应用广泛（Hashim *et al.*, 2016; 卢诗剑等, 2023）。沉香的基源植物是瑞香科 Thymelaeaceae 沉香属 *Aquilaria* 的经济树种，是树体在生长过程中木质部遭受外界伤害或被真菌感染后形成的含树脂的木材，目前尚无法人工合成（田耀华等, 2009）。由于市场对天然沉香的需求量极高，野生沉香属植物的盗采盗伐现象十分猖獗，目前该属的全部种已被列入濒危野生动植物种国际贸易公约（CITES）。在我国，土沉香 *Aquilaria sinensis* 又名白木香，是重要的沉香基源植物，由于其野生资源接近枯竭，现已被列入国家二级重点保护野生植物（马华明, 2013）。目前，土沉香已在广东、广西、云南、海南等地大面积栽

培（2022 年全国栽培面积超过 3 500 ha），并形成了配套完善的沉香生产、资源开发和旅游休憩等下游产业，在乡村振兴中发挥了重要作用（卢诗剑等，2023）。

近年来，由于土沉香食叶害虫黄野螟 *Heortia vitessoides* 的频繁爆发，我国沉香产业的可持续发展受到了极大制约。该虫有聚集为害的习性，常形成数百头的集群大量取食土沉香叶片，严重时大片树木呈现“光杆状”危害（沙林华等，2018）（图 1）。同时，黄野螟一年可发生数代，叶片被反复取食殆尽的土沉香会出现树势衰弱甚至死亡，更进一步地影响了沉香产业的效益。在广东，黄野螟已被视为重要的突发性食叶害虫种类之一（谢伟忠等，2017）。当前，使用化学农药是防治黄野螟的最主要手段，然而农药残留等问题极大的降低了沉香的品质和价格，影响了沉香产品的出口外销（冼世庆等，2021）。因此，近 15 年来黄野螟得到了各地政府和相关科研机构的高度关注。许多研究集中于黄野螟的生物防治和抗性土沉香种质的发掘，与生产实践中对黄野螟绿色防控的需求高度一致。此外，由于黄野螟经常爆发、易于采集且具有一些较为独特的行为和生理特征，也被作为模式生物用于研究林业鳞翅目害虫的生物学特性。本综述系统总结了黄野螟的形态特征、分布危害、行为习性、分子生物学、化学生态以及综合防控技术的研究进展，以为黄野螟科学研究和绿色防控技术开发提供参考。



图 1 土沉香种植园内的黄野螟幼虫为害状

Fig. 1 Damage of *Heortia vitessoides* larvae in a *Aquilaria sinensis* plantation

## 1 黄野螟的形态、分布与危害

### 1.1 黄野螟形态

#### 1.1.1 卵的形态结构

黄野螟的卵为聚产，卵块直径为  $2.38 \pm 0.56$  mm，平均卵量为  $203.0 \pm 43.7$  粒/块，卵粒

呈扁圆形，直径为 0.75~0.94 mm，呈鱼鳞状排列（陈志云等，2011；王忠等，2018）。卵壳不光滑，在显微镜下可观察到纹理（乔海莉等，2013）。卵初产时呈乳白色，随后变为黄色，近孵化时则变为黑色或黑褐色，且在孵化前数小时可观察到卵内幼虫黑色的头壳（陈志云等，2011）。

#### 1.1.2 幼虫形态结构

乔海莉等（2013）报道黄野螟幼虫共有 5 个龄期，其中 1 龄幼虫头部呈黑色，身体呈淡黄色；2 龄幼虫体表变为黄绿色；3 龄幼虫头部变为浅褐色，胸部和腹部两侧出现明显的黑线；4 龄幼虫头部转变为红褐色，前胸背板呈现浅黄褐色；5 龄幼虫的前胸背板转变为黄褐色。张蒙等（2014）研究了黄野螟幼虫的头部器官和感器，发现 5 对侧单眼呈“C”字形排列；1 对触角（3 节）位于上颚和单眼之间，其中第 2 节和端节分布有 5 种感器，分别为毛形感器、短毛感器、锥形感器、栓锥感器和小锥形感器；口器为咀嚼式，包括上颚、下颚、上唇、下唇和吐丝器，下颚包括轴节、茎节、外颚叶、内颚叶以及下颚须；在下颚须、外颚叶侧壁和外颚叶端部边缘均分布有栓锥感器，且外颚叶侧壁和端部边缘还分布有锥形感器；下唇前颊的前端两侧存在下唇须，其上分布有锥形感器、栓锥感器和刺形感器。高家军等（2023）等以 Mask R-CNN 实例分割模型为主体，并结合 Swin Transformer 模型，实现了多种场景下对黄野螟幼虫个体的精准识别，可用于黄野螟的监测。

#### 1.1.3 蛹的形态结构

黄野螟被蛹蛹体呈椭圆形，表面光滑，随时间由浅黄色逐渐变为红褐色，接近羽化前变为黑褐色；复眼和上颚尖端呈黑色；在腹部末端存在 4 根略微弯曲的臀刺；前翅包被到腹部第 5 节末端，在接近羽化时转变为明显的灰白相间条纹（乔海莉等，2013）。曹春雷等（2013）报道雄蛹、雌蛹在腹节处存在一定的形态差异，如雌蛹在第 8 腹节有一纵裂缝（由生殖孔和产卵孔连接形成）且裂缝两侧平坦，而雄蛹的生殖孔裂缝位于第 9 腹节，长度大于雌蛹，且裂缝两侧呈半圆状突起；在雄蛹的第 8 腹节末端还有 1 对左右对称的柳叶眉状斑纹，而雌蛹没有；此外，雄蛹的腹部末端分节较雌蛹更为明显。

#### 1.1.4 成虫形态结构

头部：黄野螟成虫头部有一对丝状触角，包括柄节、梗节和鞭节（乔海莉等，2019；Liu *et al.*, 2023）。触角上分布有 8 种类型的化学感器，分别为刺形感器、腔锥形感器、栓锥形感器、锥形感器、耳形感器、毛形感器、鳞形感器和 Böhm 氏鬃毛（乔海莉等，2019）。柄节、梗节和鞭节背面上均存在鳞片和少量化学感器，而鞭节的腹面和侧面存在大量感器，尤其是在鞭节的基部（乔海莉等，2019；Liu *et al.*, 2023）。值得注意的是，鞭节远端的化

学感器虽然数量少于基部，但感器类型更加丰富（Liu *et al.*, 2023）。黄野螟头部两侧有一对黑色的复眼，为重叠像眼，由 3 500 多个小眼组成，直径约为 950  $\mu\text{m}$ ；约 13.85  $\mu\text{m}$  厚的角膜晶体覆盖在小眼上，角膜表面存在角膜乳突，呈六边形排列；每个小眼有 1 个晶锥，由 4 个晶锥细胞组成，晶锥周围有 2 个初级色素细胞；感杆束为中心融合型，由 8~11 个视网膜细胞组成（Pan *et al.*, 2023）。喙和下唇须是黄野螟成虫主要的味觉感受器官，位于两个复眼之间，正常情况下喙呈螺旋状，与两侧的下唇须相连，进食或探查环境时，喙完全伸展为长管状，下唇须略微突起（Liu *et al.*, 2023）。在喙的表面存在大量角质层突起，从基部到远端逐渐减少，喙的表面存在栓锥形感器、锥形感器、毛形感器和刺形感器 4 种感器；下唇须向上弯曲呈“C”形，其表面覆盖有密集的鳞片，并存在 4 种感器，分别为刺形感器、钟形感器、鳞形感器和微毛（Liu *et al.*, 2023）。

胸部：黄野螟成虫的胸部呈黄色，覆盖有黑色的鳞毛。胸部的侧腹面拥有 3 对足，均由基节、转节、腿节、胫节和跗节 5 个部分组成，足上的感器主要分布在跗节上，尤其是跗节基部，分别有锥形感器、毛形感器和鳞形感器（Liu *et al.*, 2023）。前足胫节的远端腹面有前胫突，中足、后足的胫节上均有 1 对尖刺，且后足胫节的中间有 1 对内侧距；跗节由 1 对侧爪组成，侧爪之间存在 1 个爪间突和中垫，侧爪和中垫被角质层包围，其上存在大量类似刺的突起，由基部到远端长度逐渐增加（Liu *et al.*, 2023）。

腹部：成虫腹部共有 6 节，基部背面有黑色环状条纹，雌性的腹部呈桔黄色、较粗，末端较钝，且生殖孔周围丛生黑色短毛，而雄性的腹部为黄色、细长，末端较尖，生殖孔周围有黄色长毛（乔海莉等，2013）。雌性成虫的性信息分泌腺为腹部末端第 8 腹节和第 9 腹节的节间膜上的囊状体，环绕整个腹节呈环状结构，表面具有复杂的褶皱和起伏，且具有 3 种感器，包括毛形感器、刺形感器和锥形感器（钱沉鱼等，2024）。此外，性信息素分泌细胞呈柱形或圆形，腺体周围存在发达的肌肉层，细胞表面分布有导管状结构和特异分化的微绒毛（钱沉鱼等，2024）。

## 1.2 黄野螟的分布与危害

在我国，黄野螟分布于云南、海南、广西、广东、台湾和香港等省份（Xu *et al.*, 2020）。Xu 等（2020）报道最暖季度降水量（Precipitation of warmest quarter）、最干季度降水量（Precipitation of wettest quarter）、最冷月份最低温度（Min temperature of coldest month）和最暖季度平均温度（Mean temperature of warmest quarter）是影响黄野螟分布的重要气候因子。最大熵模型（Maximum entropy modeling）推测在当前气候条件下，黄野螟在我国的适生区面积达  $1.07 \times 10^6 \text{ km}^2$ ；其中，高度适生区包括珠江流域和澜沧江流域以南的地区，面积

达  $4.62 \times 10^5 \text{ km}^2$  (Xu *et al.*, 2020)。随着气候变暖,黄野螟的分布存在向北扩展的趋势,预计到 2050 年,处于中亚热带湿润气候区的四川盆地也将成为高度适宜黄野螟生存的区域 (Xu *et al.*, 2020)。黄野螟具有爆发暴食性,短时间内即可取食大量土沉香叶片,造成树势衰弱,反复将叶片啃食殆尽后甚至导致植株死亡 (陈志云等, 2011; 乔海莉等, 2013)。然而,目前国内尚未有土沉香受害率、植株死亡率和经济损失的具体数据,未来应予以特别关注。

在国外,黄野螟主要分布于斐济、孟加拉、印度、斯里兰卡以及澳大利亚昆士兰州北部地区 (乔海莉等, 2013),主要危害土沉香、厚叶沉香 *Aquilaria crassna* 和马来沉香 *Aquilaria malaccensis* 等 (Sajap, 2013; Syazwan *et al.*, 2019)。Sondhi 等 (2018) 于 2014 年 10 月在印度南部的喀拉拉邦首次发现黄野螟。Prathapan 和 Santhoshkumar (2023) 报道在 2022 年,喀拉拉邦一些地区的马来沉香受到大量黄野螟的侵害,受害率高达 96.6%,更有 5% 的马来沉香死于虫害。Kuntadi 等 (2016) 报道在印度尼西亚爪哇岛西部的万丹省 Carita 研究林区,大多数沉香属植物每年均受到黄野螟的危害 2~3 次,主要发生在 7~9 月的旱季。

## 2 黄野螟行为与习性

### 2.1 生活史

陈志云等 (2011) 报道在 26°C 条件下,非越冬代黄野螟的卵期、幼虫期、预蛹期和蛹期分别为 6.6 d、14.1 d、2.9 d 和 9.8 d,雌、雄成虫寿命分别为 8.7 d 和 8.6 d。而在印度东北部地区,取食马来沉香的黄野螟的卵期、幼虫期、预蛹期和蛹期分别为 4.7 d、15.7 d、2.2 d 和 16.7 d,雌、雄成虫寿命分别为 8.4 d 和 3.8 d (Rahman, 2018)。王忠等 (2018) 报道黄野螟成虫寿命与是否交尾有关,未交尾雌、雄成虫的平均寿命分别为 8.8 d 和 8.2 d,而已交尾雌、雄成虫的平均寿命分别为 6.3 d 和 5.8 d。乔海莉等 (2013) 报道黄野螟在广东省化州地区一年发生 8 代,其中第 1~7 代幼虫的发育历期为 10~14 d,而第 8 代 (越冬代) 幼虫的发育历期为 36 d; 每年 5 月是第 1 代幼虫的发生盛期,而第 1 代成虫的羽化盛期为 5 月底至 6 月初,从第 2 代开始出现世代重叠现象;第 1~7 代每代约历时 1 个月,而第 8 代的老熟幼虫在 12 月中旬化蛹后,直至第二年 4 月中旬至 5 月上旬才开始羽化。严珍和岳建军 (2019) 在 11~35°C 设置 7 个温度梯度恒温饲养黄野螟幼虫,发现在 35°C 条件下虫卵无法孵化,在 11°C 条件下幼虫无法完成生长发育,在 15~31°C 幼虫的发育历期随温度上升而显著减少;根据“最小二乘法”计算黄野螟 (全世代) 的发育起点温度和有效积温分别为 9.22°C 和 718.10 d·°C,根据气象资料推算黄野螟在云南西双版纳州一年发生 5~7 代。与之相似,周亚奎等

(2017) 计算黄野螟（全世代）的发育起点温度和有效积温分别为 9.97°C 和 619.49 d·°C，在海南省一年发生 8~10 代。尽管黄野螟每年可多代发生，但夏季的高温不利于黄野螟的生存繁殖；因此，在我国，黄野螟的危害高峰期主要集中在 5~8 月和 10~12 月，因各地气候条件的差异而有所不同（陈志云等，2011；李涛等，2015）。

## 2.2 幼虫聚集行为

鳞翅目幼虫的聚集行为已在 23 个科中被发现（Qian *et al.*, 2024a）。黄野螟幼虫的聚集行为与其它物种有相似之处，如低龄黄野螟幼虫常形成较大的群体（图 2-A），而高龄的幼虫则形成规模较小的集群或分散取食。但黄野螟幼虫的聚集行为也具有一些特点，如 Liang 等（2019）从野外共采集了 102 个黄野螟幼虫群体，其中 54 个集群由相同龄期的黄野螟幼虫组成（同龄群体），而剩余的 48 个集群则由不同龄期的幼虫组成（混龄群体）。Liang 等（2019）认为黄野螟混龄群体的产生存在两种机制：（1）来自不同群体的不同龄期幼虫重新组合或融合形成新的混龄群体（在野外发现由 1、2、3 或 2、3、4 龄幼虫组成的集群）；（2）同一群体的不同个体发育速度不同导致（为实验室研究所证实）。将黄野螟初孵幼虫或 2 龄幼虫从群体中单独移出后，分散的个体表现出强烈的重新聚集的倾向，且不同来源幼虫（孵化自同一卵块或不同卵块）的聚集指数无显著差异，表明黄野螟幼虫的聚集行为不受亲缘关系的影响（Liang *et al.*, 2019）。因此，Qian 等（2024a）认为黄野螟幼虫的聚集行为是集体选择（Group selection），而非亲缘选择（Kin selection）的结果。群体生活对初孵幼虫的存活至关重要，单独饲养的初孵幼虫个体均在 2 d 内死亡。当设置初孵幼虫数量为 10 头（来自同一群体）或 20 头（孵化自同一卵块或不同卵块）时，幼虫发育历期和存活率均无显著性差异（Liang *et al.*, 2019）。然而，当设置初孵幼虫数量为 30 头、60 头和 90 头时，大群体中黄野螟幼虫的体长和发育速度显著高于小群体，但三者幼虫的存活率无显著差异（黄志嘉等，2022）。



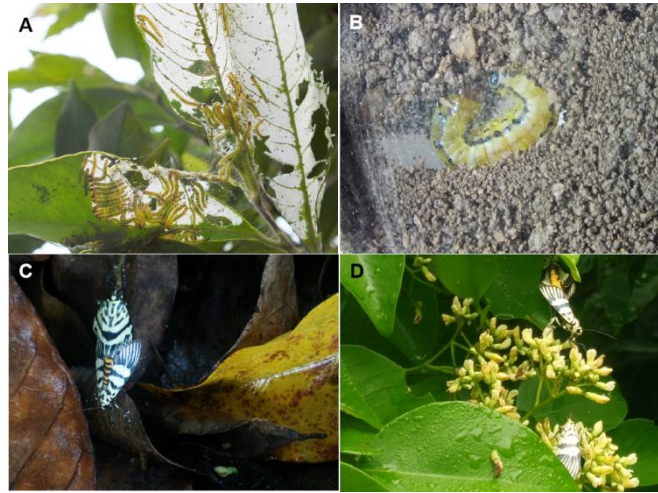


图2 黄野螟幼虫的聚集行为 (A)，预蛹的入土化蛹行为 (Wen *et al.*, 2017) (B)，以及成虫的交配行为 (C) 和访花行为 (D)

Fig. 2 Aggregation behavior of *Heortia vitessoides* larvae (A), soil-pupating behavior of prepupa (Wen *et al.*, 2017) (B), and mating behavior (C) and flower-visiting behavior (D) of adults

### 2.3 幼虫取食行为

黄野螟幼虫孵化后先取食卵壳，后取食叶片；1龄和2龄幼虫多啃食叶肉，常留下黄白色叶膜和部分叶脉；3龄幼虫开始取食叶片，使之形成缺刻；4龄后，幼虫取食全叶，仅留光枝（乔海莉等，2013）。陈志云等（2011）报道4龄和5龄黄野螟幼虫的取食量分别占幼虫期的20.4%和70.2%，尤以预蛹期前三天取食量最大。在食物不足的情况下，土沉香花、果、甚至枝条的皮层也会被啃食；在食物完全耗尽后，黄野螟幼虫可从树干爬下，迁移到其它植株继续为害（苏跃平，1994；乔海莉等，2013）。彭思颖等（2022）报道在选择实验中，4龄幼虫倾向于取食嫩叶；在非选择实验中，与啃食老叶的幼虫相比，啃食嫩叶的幼虫具有更高的相对生长率、近似消化率和食物转化率，但食物利用率有所降低。此外，幼虫的耐饥饿能力与环境温度有关，在25°C和30°C温度下，饥饿3d的幼虫全部死亡，而在10°C温度下，幼虫饥饿7d后才全部死亡（彭思颖等，2022）。

### 2.4 预蛹入土化蛹行为

黄野螟需在土壤中化蛹羽化，在实验室条件下，绝大多数未能成功钻入土壤的预蛹无法成功化蛹并最终死亡（文玉珍，2017）。Wen等（2017）使用透明亚克力板夹层装置观察和描述了黄野螟入土化蛹及羽化的完整过程，发现预蛹首先在土壤（砂壤土）表面活跃爬行，随后用头和前足挖掘并钻入土壤基质；当到达合适的深度后，预蛹便卷曲身体旋转运动，并用前胸足和头不断压缩土壤（图2-B），直至形成1个卵圆形的中空腔室，最后吐多层丝修饰蛹室内壁。该研究还比较了不同含水饱和度（5%、25%、45%和65%）对黄野螟化蛹行



为及蛹形态与生理的影响,发现在 5%含水饱和度条件下,黄野螟蛹的体积、表面积、鲜重、含水量等指标均显著小于其他含水饱和度的土壤,而表体比(蛹的表面积/体积)和化蛹期间损失的生物量(幼虫鲜重-蛹鲜重)则在 5%含水饱和度下最高。Wen 等(2016)进行选择实验表明黄野螟倾向于选择在 20%~60%含水饱和度的基质(沙和土壤)中化蛹,在过干(0%含水饱和度)和过湿(80%~100%含水饱和度)基质中化蛹的个体数较少;非选择实验则表明过高或过低的基质湿度显著降低黄野螟成虫的羽化率。这些结果表明黄野螟预蛹能够主动寻找适宜的化蛹环境。

## 2.5 成虫生殖行为

王忠等(2018)报道黄野螟的羽化期为 10 d 左右,成虫羽化高峰出现在进入暗期后的 2 h(即 20:00-22:00),且雄蛾先于雌蛾羽化。周亚奎等(2019)也报道实验室饲养的黄野螟成虫羽化高峰在 19:00-23:00,但野外采集的黄野螟蛹的羽化高峰在 21:00-1:00,较实验室饲养的黄野螟有所推迟。此外,王忠等(2018)在实验室观察到黄野螟雌蛾在暗期求偶,处女雌蛾的求偶高峰发生在 20:00-21:00,且 2~3 日龄的雌蛾求偶次数最多,随着日龄增加,求偶次数减少;求偶时,雌蛾的腹部末端轻微抬起,并将产卵器和性腺暴露于空气中;雄蛾收到召唤后飞向雌蛾,两者交尾时静止不动(图 2-C),交配结束后雄蛾飞离,在实验室条件下未见多次交尾现象;雌蛾在交配后第 2 天的夜间产卵,卵为聚产,每头雌蛾可产 1~2 个卵块,常集中于叶片背面靠近叶尖处。陈志云等(2011)报道大部分的卵块都产于树冠底层,以嫩叶为主。此外,在野外有时可见多个卵块产于同一枚土沉香叶片,如梁仕萍(2021)在 44 枚土沉香叶片上发现 58 个黄野螟卵块,其中 33 枚叶片发现单个卵块,剩下的 11 枚叶片上同时有 2~3 个卵块。补充外源营养对黄野螟雌蛾产卵有重要影响,饲喂 10%蔗糖溶液的雌蛾产卵量显著高于饲喂 10%蜂蜜和 10%葡萄糖溶液的雌蛾,而饲喂清水和不饲喂的雌蛾未见产卵(严珍和岳建军,2019)。同时,野外常见黄野螟成虫吸食多种植物的花蜜(图 2-D),每次吸蜜时间可达 10 min(乔海莉等,2013)。

# 3 黄野螟的分子生物学研究

## 3.1 基因组学研究

### 3.1.1 线粒体基因组

Liao 等(2019)对黄野螟的线粒体基因组进行了完整测序,获得了长达 15 516 bp 的环状基因组序列,该基因组包含 60 个基因,包括 12 个蛋白质编码基因、2 个核糖体 RNA 基因和 46 个转运 RNA 基因。通过对包括黄野螟在内的 19 个鳞翅目昆虫进行系统发育分析,

发现黄野螟与稻苞虫 *Chilo suppressalis* 和二化螟 *Ostrinia furnacalis* 亲缘关系最近, 支持了它们在螟蛾总科 Pyraloidea 中的分类地位。

### 3.1.2 全基因组

Law 等 (2022) 对黄野螟进行了染色体水平的基因组组装, 构建了 1 个包含 517 Mb 序列的高质量基因组。通过整合 8 个不同发育阶段的转录组数据, 研究预测了 16 421 个基因模型, 并发现与外源物质代谢和发育相关的基因家族出现了显著扩展, 特别是胞质硫酸转移酶 (SULT) 基因的重复。此外通过小 RNA 测序, 研究还鉴定了 85 个保守的鳞翅目微小 RNA 和 94 个系特异性微小 RNA。

### 3.2 生长发育功能基因研究

近年来, 多个与黄野螟生长发育相关的功能基因相继被报道 (表 1)。这些研究基于转录组数据筛选了潜在功能基因, 利用实时荧光定量 PCR (RT-qPCR) 分析了这些基因在不同组织、发育阶段及蜕皮激素处理下的表达模式, 并通过 RNA 干扰 (RNAi) 技术进行了功能验证。沉默这些关键基因通常导致黄野螟幼虫发育畸形、化蛹、羽化和存活率显著降低, 表明这些基因在黄野螟的正常发育过程中发挥着重要作用。

表 1 已进行功能验证的黄野螟生长发育相关基因

Table 1 Genes Related to Growth and Development of *Heortia vitessoides* with Verified Functions

基因名称 Gene Name	中文名称 Chinese Name	潜在调控功能 Potential Regulatory Function	参考文献 References
<i>HvCDA1</i> , <i>HvCDA2</i>	几丁质脱乙酰基酶基因 Chitin deacetylase gene.	翅发育 Wing development	Wang <i>et al.</i> , 2019
<i>HvNAG1</i>	$\beta$ -N-乙酰葡萄糖胺糖苷酶基因 $\beta$ -N-acetylglucosaminidase gene.	翅发育 Wing development	Lyu <i>et al.</i> , 2019a
<i>HvEH</i>	羽化激素基因 Ecdysis hormone gene	翅发育 Wing development	Li <i>et al.</i> , 2020
<i>HvJHDK</i>	保幼激素二醇激酶基因 Juvenile hormone diol kinase gene	激素合成 Hormone synthesis	Lyu <i>et al.</i> , 2019b
<i>HvTPS</i>	海藻糖合成酶基因 Trehalose synthase gene	几丁质与脂质合成 Chitin and lipid synthesis	Chen <i>et al.</i> , 2020
<i>HvChsb</i>	几丁质合成酶 B 基因 Chitin synthase B gene	进食行为 Feeding behavior	Chen <i>et al.</i> , 2023a
<i>HvFABP</i>	脂肪酸结合蛋白基因 Fatty acid-binding protein gene	蜕皮 Ecdysis	Ye <i>et al.</i> , 2023
<i>HvCP3L</i>	角质蛋白基因 Cuticular protein gene	蜕皮 Ecdysis	Wang <i>et al.</i> , 2024

注: 潜在调控功能为研究者根据实验结果推测的基因功能, 尚需进一步功能验证。Note: The potential regulatory functions were inferred by researchers based on experimental results, and further functional validation is required.

### 3.3 环境适应的分子机制

Cheng 等(2018a)研究了黄野螟热休克蛋白(HSP)基因(*HvHsp60*、*HvHsp70* 和 *HvHsp90*)的表达模式和潜在功能。结果显示, 3 个基因在所有发育阶段均有表达, 且在蛹期和成虫期的表达量最高。此外, 这些基因在不同的组织中也表现出显著的表达差异, 尤其是在幼虫的脂肪体和成虫的腹部。热胁迫实验显示, 3 个基因在受到 35°C、40°C 和 45°C 的高温处理后显著上调, 表明它们在黄野螟应对高温胁迫中发挥了重要作用。此外, Cheng 等(2018b)研究了黄野螟中过氧化氢酶(CAT)基因(*HvCAT*)的表达模式和功能。结果表明, *HvCAT* 在 5 龄幼虫期和成虫腹部的表达量最高。热胁迫实验显示, 在 35~39°C 的温度条件下, *HvCAT* 基因的表达水平和酶活性显著上调。通过 RNAi 技术沉默 *HvCAT* 基因后, 发现黄野螟在热胁迫条件下的存活率显著降低。此外, 还发现沉默 *HvCAT* 基因的影响了其他抗氧化酶基因的表达。例如, 硫氧还蛋白过氧化物酶(Tpx)的表达上调, 而铜锌超氧化物歧化酶(Cu/ZnSOD)的表达下调。

### 3.4 杀虫剂代谢与抗性机制

Cheng 等(2017)对黄野螟进行了真核无参(De novo)转录组测序与分析, 并组装得到 66 673 个单基因簇(Unigene), 平均长度为 957 bp。基于多种数据库(如 NR、Swiss-Prot、KEGG、KOG、GO)功能注释, 共筛选到 1 000 个与抗杀虫剂相关的单基因簇。此外, Cheng 等(2018c)研究了黄野螟的多种谷胱甘肽-S-转移酶基因(GSTs), 通过转录组共分析鉴定了 16 个 GST 基因(*HvGSTs*)。系统发育分析结果显示, 这些基因被分类为了 7 个不同的细胞质类群, 包括 Delta、Epsilon、Omega、Sigma、Theta、Zeta 和未分类类群。表达模式分析显示, 这些基因在幼虫和成虫的不同组织中有表达差异, 特别是在肠道、马氏管和脂肪体中显著高表达。杀虫剂暴露条件下, 发现 *HvGSTd1*、*HvGSTd3*、*HvGSTe2*、*HvGSTe3*、*HvGSTo3*、*HvGSTs1*、*HvGSTs3*、*HvGSTu1*、*HvGSTu2* 在暴露氯虫苯甲酰胺后显著上调, *HvGSTd1*、*HvGSTd3*、*HvGSTe2*、*HvGSTo2*、*HvGSTs1*、*HvGSTu1* 在暴露 $\beta$ -氯氰菊酯后显著上调, 表明这些基因可能参与了对这些杀虫剂的解毒过程。

## 4 黄野螟的化学生态学研究

### 4.1 黄野螟性信息素

周亚奎等(2019)在不同时间段将黄野螟雌蛾的性腺剪下后使用正己烷浸提, 得到一系列雌蛾性腺粗提物; “Y”型嗅觉仪测试显示雌蛾于 23:00 至次日 2:00 释放的信息素对雄蛾的吸引效果显著强于其他时间段, 且 0:00 至 1:00 释放的信息素吸引的雄蛾最多, 表明性信

息素的释放存在节律，在午夜达到高峰；使用性腺粗提物在野外进行诱捕试验，诱虫量在 22:00 至次日 2:00 出现第 1 个高峰，在凌晨 4:00-6:00 出现第 2 个高峰。张胜男等（2016）采用 3 种方法（吸附法、溶剂提取法、腺体直接进样法）获得黄野螟性信息素粗提物，其中吸附法和溶剂提取法各找到 2 种性信息素疑似物，而腺体直接进样法未分析出性信息素的疑似组分。苏浩然等（2023）发现黄野螟雌蛾腹部中段的挥发物能引发雄蛾触角强烈的电生理反应，并从中发现 2 个特异的信息素类似物，但未能鉴定其化学结构。截至目前，尚未成功解析出黄野螟性信息素的确切成分。

## 4.2 植物源化合物对黄野螟成虫的引诱作用

### 4.2.1 土沉香挥发物

Qiao 等（2012）报道在风洞实验中土沉香新叶产生的挥发性物质较老叶能吸引到更多的黄野螟雌蛾。GC-EAD 测试从新叶挥发物中鉴定出 9 种能引起雌蛾触角电位反应的化学物质。其中，壬醛（Nonanal）、癸醛（Decanal）和 2,6,10-三甲基十二烷（2,6,10-Trimethyl-dodecane）同时见于新叶和老叶挥发物，而二甲基己醇（2-Hexanol）、叶醇（(Z)-3-Hexen-1-ol）、(Z)-乙酸-3-己烯酯（(Z)-3-Hexenyl acetate）、己醛（Hexanal）、辛醛（Octanal）和柠檬烯（Limonene）仅见于新叶挥发物。当己醛、柠檬烯、二甲基己醇、(Z)-乙酸-3-己烯酯、叶醇、壬醛、癸醛和 2,6,10-三甲基十二烷以 2 : 16 : 9 : 4 : 63 : 100 : 13 : 10 : 5 的比例混合后，在风洞试验和野外诱捕试验中均对雌蛾具有较好的引诱效果。此外，当己醛、(Z)-乙酸-3-己烯酯、壬醛和癸醛以 2 : 63 : 13 : 10 的比例混合后，对雌蛾的引诱效果与以上 9 种化合物的组合相当。

### 4.2.2 花香化合物

唐丽萍（2019）报道降香黄檀 *Dalbergia odorifera*、红花羊蹄甲 *Bauhinia blakeana* 和微甘菊 *Mikania micrantha* 的花精油能引起黄野螟雌雄蛾的触角电位反应，然而在林间实验中这 3 种精油对成虫的诱捕效果均不甚理想。Qian 等（2024b）则从土沉香、降香黄檀和杜英 *Elaeocarpus decipiens* 3 种植物的花香挥发物中筛选出 11 种可以引起黄野螟成虫触角电位反应的活性成分，分别为己醛、庚醛（Heptanal）、1-辛烯-3-醇（1-Octen-3-ol）、石竹烯（Caryophyllene）、橙花醇（Nerol）、苯甲醛（Benzaldehyde）、芳樟醇（Linalool）、香叶醇（Geraniol）、苯乙醇（Phenethyl alcohol）、苯甲醇（Benzyl alcohol）和 $\beta$ -罗勒烯（ $\beta$ -Ocimene）。其中，黄野螟雌蛾对己醛、庚醛和石竹烯的触角电位反应最强，而雄蛾对庚醛、1-辛烯-3-醇和芳樟醇的触角电位反应最强。在“Y”型管试验中，含有这 11 种活性组分诱芯能引起黄野螟成虫显著的趋向反应，然而该研究未进行野外引诱测试。

## 4.3 黄野螟幼虫体表化合物对聚集行为的影响

Yang 等 (2024) 通过双选择实验测试了黄野螟 2 龄和 5 龄幼虫的正己烷和丙酮浸提液对 2 龄幼虫聚集行为的影响。结果表明, 2 龄幼虫显著倾向于聚集在涂抹了 2 龄幼虫正己烷浸提液的叶片上, 而 5 龄幼虫的正己烷浸提液对 2 龄幼虫聚集选择无显著影响。此外, 2 龄和 5 龄幼虫的丙酮浸提液均对 2 龄幼虫具有驱避作用。未来可进一步分析鉴定黄野螟幼虫体表化合物的成分, 并研究其在幼虫聚集行为中的作用, 筛选对黄野螟幼虫具有吸引或驱避作用的化合物, 以期应用于幼虫的防治。

#### 4.4 黄野螟的化学感受相关功能基因

Cheng 等 (2019) 通过黄野螟的触角转录组鉴定了 61 个嗅觉相关基因, 包括 28 个气味受体 (OR)、9 个气味结合蛋白 (OBP)、10 个化学感受蛋白 (CSP)、12 个离子型受体 (IR) 以及 2 个感觉神经元膜蛋白 (SNMP) 基因。研究利用 RT-qPCR 分析了部分基因在不同性别触角中的表达模式, 例如, *HvitOBP1*、*HvitOBP6* 和 *HvitGOBP1* 在雌性触角中高表达, 而 *HvitOBP2*、*HvitOBP3*、*HvitOBP5*、*HvitGOBP2* 和 *HvitPBPI* 在雄性触角中高表达, 表明它们可能在性别特异的嗅觉功能中发挥作用。李资聪等 (2021) 则通过黄野螟的触角和口器转录组鉴定了 124 个化学感受基因, 包括 50 个 OR 基因、19 个 OBP 基因、17 个 CSP 基因、19 个 IR 基因、2 个 SNMP 基因及 17 个 GR 基因。通过使用 RT-qPCR 技术和系统进化分析, 研究者分析了部分基因在不同性别成虫组织中的表达模式和潜在功能。例如, *HvitOR42* 和 *HvitOR43* 在雄性成虫触角中特异性高表达, *HvitCSP8*、*HvitCSP15* 和 *HvitCSP17* 在雄性成虫口器中特异高表达, 同时, 这些基因与已报道的其他昆虫的性信息素识别受体序列相似, 表明这些基因可能与黄野螟的性信息素识别有关。

#### 4.5 黄野螟-土沉香-天敌互作

Qiao 等 (2018) 报道被 3 龄和 4 龄黄野螟取食破坏 1 d 后, 土沉香即产生大量种类丰富的挥发性物质; 在随后的 3 d, 挥发性物质的总浓度逐渐降低, 到 4 d 后达到和未破坏植株 (对照) 相似的水平。在风洞实验中, 相较于被黄野螟破坏土沉香植株产生的挥发性物质, 未破坏植株产生的挥发性物质能够吸引更多雌蛾 (Qiao *et al.*, 2018)。然而, 在双向选择实验中, 破坏 1~3 d 后土沉香植株产生的挥发性物质较对照吸引到显著更多的捕食性天敌海南螭 *Cantheconidea concinna* (Qiao *et al.*, 2018)。这些结果表明黄野螟-土沉香-天敌间存在复杂的相互作用, 被黄野螟破坏的土沉香可能驱避雌蛾产卵并产生吸引天敌昆虫的挥发性物质。

## 5 黄野螟防治

## 5.1 抗性土沉香品系及其抗性机制

茅裕婷等(2017)在广州黄埔区天麓湖土沉香种植基地内发现了2株有明显抗虫性的植株,尽管周围感虫植株的叶片被黄野螟幼虫取食殆尽,但这2株抗虫植株的叶片基本完好或仅有轻度危害。双向选择试验表明在抗性植株叶片上聚集和取食的黄野螟幼虫显著低于采自周围感虫植株的叶片(Jin *et al.*, 2016)。此外,与取食感虫土沉香叶片的黄野螟幼虫相比,取食这2株抗性土沉香叶片后,幼虫的存活率、干重、取食率、近似消化率和乙酰胆碱酯酶活性、蛹质量、成虫的羽化率与寿命均显著降低,且发育历期显著增长(茅裕婷等, 2017; 朱诚棋等, 2017a)。进一步研究表明这2株抗性植株叶片的上表皮角质层厚度与丹宁含量均显著高于感虫植株,但叶片可溶性糖和可溶性蛋白含量显著低于感虫植株(茅裕婷等, 2017; 朱诚棋等, 2017b)。与之类似,陈彧等(2024)在海南省筛选了5个抗黄野螟的土沉香植株,其叶片的单宁与类黄酮含量高于感虫植株,但叶片可溶性糖和可溶性蛋白含量较低;此外,抗性植株叶片中含有较多具有驱虫活性的挥发性成分。

## 5.2 生物防治

### 5.2.1 天敌

捕食性天敌:肖宁等(2020)在广东茂名土沉香林中调查发现黄野螟的捕食性天敌4目5科9种,分别为中华单羽食虫虻 *Cophinopoda chinensis*、益蝽 *Picromerus lewisi*、举腹蚁 *Cremastogaster sp.*、黄猷蚁 *Oecophylla smaragdina* 以及5种螳螂。实验室研究表明螳螂主要捕食3~4龄的黄野螟幼虫,对1~2龄的低龄幼虫和5龄的高龄幼虫接触较少,且广斧螳 *Hierodula patellifera* 成虫对黄野螟幼虫的日捕食量显著高于其它4种螳螂(肖宁等, 2021)。在野外土沉香林投放人工繁殖的广斧螳成虫(5头/株)和卵鞘(150个/hm<sup>2</sup>)12个月后,土沉香失叶率与黄野螟虫口密度较对照分别下降49.2%与74.0%(王祥等, 2022a)。李文华等(2015)评估了叉角厉蝽 *Eocanthecona furcellate* 对黄野螟3龄和5龄幼虫的捕食量,发现其捕食量随着黄野螟幼虫密度的增加而显著提高。然而,叉角厉蝽在野外对黄野螟幼虫的捕食量显著低于在养虫盒与养虫笼中的捕食量,这可能是由于野外具有较高的空间异质性且环境因子复杂(李文华等, 2015)。

寄生性天敌:洗世庆等(2021)报道广赤眼蜂 *Trichogramma evanescens* 可寄生黄野螟卵块。由于广赤眼蜂每年可繁殖17代,在实验室和野外条件下出蜂率分别达到93.69%和87.16%,在野外对黄野螟卵的平均寄生率可达55.74%,具有较高的生防潜力(王祥等, 2022b)。初步的野外试验表明,在黄野螟产卵初期和产卵初期4d后各放1次广赤眼蜂科可有效降低黄野螟幼虫虫口密度(洗世庆等, 2021)。Yan等(2020)在云南省的土沉香林发现暗黑赤



眼蜂 *Trichogramma pintoi* 也可寄生黄野螟卵块。实验室研究表明暗黑赤眼蜂主要寄生 1~4 日龄的卵且更倾向于寄生 1 日龄的卵，但无法寄生 5~8 日龄的卵；羽化后的雌蜂平均存活 4.7 d，平均产卵 89.8 枚，其中 66.3% 的卵都是在雌蜂羽化后 2 d 内产下的。在人工培养环境下，雌性 F1 代暗黑赤眼蜂的产量在 25°C、75% RH、完全黑暗、亲代雌蜂刚羽化交配、提供 40 枚或 80 枚 1 日龄的黄野螟卵并同时提供 10% 蔗糖溶液时达到最高 (Yan *et al.*, 2023)。

### 5.2.2 病原微生物

陈人豪等 (2023) 评估了 20 亿 PIB/mL 棉铃虫核型多角体病毒对不同龄期黄野螟幼虫的毒力，87.54 mg/L 浓度下所有龄期幼虫的平均死亡率均达到 90% 以上，140.06 mg/L 浓度下所有幼虫均死亡。谭志琼和张荣意 (2005) 从病死黄野螟幼虫个体中分离出粘质沙雷氏菌 *Serratia marcescens*。赵鹏飞 (2019) 也从死亡的黄野螟幼虫个体中分离出红绶曲霉 *Aspergillus nomius*，使用其孢子悬浮液 ( $10^8$  孢子/mL) 接种 3 d 和 7 d 后，黄野螟幼虫的死亡率分别达到 74.1% 与 83.3%。Barman 和 Nath (2002) 报道  $1 \times 10^7$  孢子/mL 的球孢白僵菌 *Beauveria bassiana* 导致 86.3% 的黄野螟 3 龄幼虫死亡。梁仕萍 (2021) 报道两株金龟子绿僵菌 *Metarhizium anisopliae* GIM3.528 和 CQMa421 孢子悬浮液对黄野螟 2 龄幼虫的致死中浓度分别为  $1.4 \times 10^8$  孢子/mL 和  $2.1 \times 10^7$  孢子/mL。Qian 等 (2023) 报道直接接触金龟子绿僵菌的黄野螟幼虫 (供体) 能够将致病真菌传染给群体中未直接接触绿僵菌的个体 (受体)，导致后者的死亡率较对照显著上升。此外，扫描电镜也在受体幼虫的体表发现了绿僵菌孢子，证明了绿僵菌孢子在黄野螟幼虫群体中的水平传递 (Horizontal transfer)。有趣的是，当土沉香叶片被浓度为  $1 \times 10^9$  孢子/mL 的金龟子绿僵菌 CQMa421 和 CQMa102 孢子悬液处理后，黄野螟幼虫对处理叶片的取食量显著低于未处理叶片；然而，相同浓度的金龟子绿僵菌 GIM3.528 未引起黄野螟幼虫的避忌反应 (Qian *et al.*, 2023)。此外，黄野螟预蛹入土化蛹的过程中也可能接触和感染土壤中的昆虫致病菌，如马维思 (2012) 报道 16 株金龟子绿僵菌小孢变种制成的孢子土能引起入土化蛹的黄野螟死亡，其中浓度为  $1 \times 10^9$  孢子/g 的 GB1-P 菌株引起的僵虫率可达 49%。

### 5.3 化学防治

陈人豪等 (2023) 使用浸叶饲喂法测试了 4.5% 高效氯氰菊酯 (EW)、5% 氯虫苯甲酰胺 (SC)、18% 杀虫双 (AS)、0.3% 苦参碱 (AS)、30% 敌百虫 (EC) 对黄野螟幼虫的毒力，其中 0.3% 苦参碱毒力最强，处理 24 h 后对 3 龄幼虫的致死中浓度为 0.386 mg/L。然而，在野外实验中，甲维·茚虫威和甲氨基阿维菌素苯甲酸盐对黄野螟幼虫的防效最好，氯氰·毒死蜱和 2.5% 高效氯氟氰菊酯次之，苦参碱防治效果最慢 (邱琼等, 2019)。值得注意的是，

评价化学农药对黄野螟幼虫的防治效果，需要综合考虑毒力和农药残留的问题。目前，尚未有详细数据报道不同农药在沉香产品中残留的剂量和时间。但一般而言，易降解、农残小的农药品种更适合用于黄野螟的防治。最近的研究表明黄野螟幼虫的聚集行为可能导致一些杀虫剂在群体中水平传递，从而增加杀虫剂的防治效果。如 Liang 等（2019）让一些黄野螟幼虫在喷有 200 ppm 的阿维菌素溶液的培养皿上爬行 30 min，随后与未直接接触阿维菌素的幼虫混合，导致后者的存活率和羽化率较对照显著降低。

#### 5.4 栽培管理

植物宿主的栽培方式对黄野螟的发生和危害程度有重要影响。麻天豪（2022）报道在土沉香人工林中，混交度、树高大小比数和冠幅大小比数均与黄野螟的发生情况呈负相关；大面积的土沉香人工林景观和较低的景观复杂程度均可导致黄野螟种群数量的增多。通过合适的栽培管理有望降低黄野螟的破坏。例如，刘志贤（2018）在马占相思纯林下套种土沉香，发现郁闭度为 0.4 时黄野螟的危害率为 16.2%，显著低于郁闭度为 0 时的危害率（92.6%）。与之相反，土沉香苗木的树高、胸径和冠幅生长量均在郁闭度为 0.4 时较高，显示适当增加郁闭度对黄野螟的防控与土沉香的生长均有正向作用。对土沉香树干造成机械创伤是人工结香的主要方法之一（黄俊卿等，2013；Zhang *et al.*, 2014；Zhang *et al.*, 2022）。有趣的是，Chen 等（2023b）发现对土沉香树干进行机械创伤可激活成熟叶片的水杨酸通路和乙烯通路，使得叶片茉莉酸含量上升，与茉莉酸相关的基因也上调表达；取食了树干被机械创伤的土沉香叶片后，黄野螟幼虫的体重、体长与取食量等指标显著低于对照，揭示了人工结香方法对土沉香抗性的影响及其作用机制。

#### 5.5 物理防治

黄野螟幼虫将土沉香叶片取食殆尽后，常集体迁移至临近的土沉香植株。基于这一习性，庞圣江和冯昌林（2019）发明了一种固定在树干的喇叭筒状防幼虫攀爬装置，可以阻止饥饿的黄野螟幼虫爬到树冠层。乔海莉等（2017）报道频振式杀虫灯对黄野螟成虫有较好的监测和杀灭效果，其性能优于其他诱虫灯。在控虫范围 100 m、悬挂高度 2 m、开灯时间 19:30、关灯时间次日 3:30 或 6:30 时，每盏频振式杀虫灯可诱杀大量黄野螟成虫，从而降低产卵率，减少下一代黄野螟的虫口密度。

#### 5.6 综合防治

综合防治指利用多种防治技术以降低害虫种群，并减少化学农药的使用量，特别适用于土沉香害虫的防控。然而，黄野螟综合防治的研究较少，仅有少数进行了野外效果的测试。例如，通过在土沉香林间或林缘按棋盘式或条带式种植蜜源植物假蒿 *Eupatorium*

*capillifolium* 和檀香 *Santalum album* (种植面积达到 5%~10%) 以吸引黄野螟成虫, 再辅以频振式杀虫灯予以物理杀灭, 每日可诱杀数百至上千头黄野螟成虫 (乔海莉等, 2016)。此外, 少数研究揭示了结合化学防治与生物防治技术控制黄野螟幼虫的应用前景。如王玲等 (2012) 报道甲氨基阿维菌素苯甲酸盐和苏云金杆菌 *Bacillus thuringiensis* 复配对黄野螟 5 龄幼虫有增效作用, 两者比例为 4 : 1 时防效最好。与之类似, 虽然单独使用低浓度 ( $1 \times 10^7$  孢子/mL) 的金龟子绿僵菌 CQMa102 及亚致死浓度 (0.1 ppm 或 1 ppm) 的化学杀虫剂 (茚虫威、氯虫苯甲酰胺、氟虫腈、乙基多杀菌素和阿维菌素) 都不足以有效杀死黄野螟幼虫, 但将两者复配使用后, 黄野螟幼虫的死亡率大为提升 (Qian *et al.*, 2023)。

## 6 结论和展望

作为沉香属植物的重要害虫, 黄野螟已广泛分布于世界各地的主要沉香产区, 对沉香产业造成巨大的经济损失。在我国, 黄野螟主要危害土沉香。随着全球变暖的气候趋势, 预计黄野螟在我国的适生范围还将不断增大 (Xu *et al.*, 2020)。黄野螟幼虫具有暴食性、爆发性的特点, 可大量取食土沉香叶片, 造成树势减弱甚至死亡。由于低龄黄野螟幼虫常形成较大的群体聚集取食, 如在此阶段集中杀灭, 可有效阻止黄野螟为害并大幅减少农药的使用量。然而, 早期黄野螟的破坏常不甚明显, 监控难度较大。在生产实践中, 通常只有当黄野螟幼虫进入高龄阶段分散取食, 将大量叶片吃光时才易于被成功监测。此时需喷洒大量杀虫剂, 极易造成农药残留问题, 影响沉香价格品质。目前, 基于无人机的农林害虫监测预警与防控技术发展较快 (徐兵强等, 2021), 建议未来结合无人机监测和施药技术, 对发生早期的黄野螟进行精准防控。

近年来, 黄野螟的绿色防控技术得到了广泛关注。在本综述中, 黄野螟生物防治相关的研究论文和学位论文占防治论文总数的一半以上。值得注意的是, 几种已报道的黄野螟天敌 (如暗黑赤眼蜂和叉角厉蝽) 已实现人工繁育 (马德英等, 2004; Yan *et al.*, 2023; 苑金戈等, 2024), 但尚需进一步测试在自然条件下利用这些天敌防控黄野螟的可靠性、可持续性和经济性。使用微生物防治菌剂已成为防控农林害虫的重要方法之一 (Brunner-Mendoza *et al.*, 2019)。然而, Qian 等 (2023) 的研究表明昆虫致病菌对黄野螟幼虫可能具有两面性。一方面, 黄野螟幼虫具有聚集习性, 可能已经像许多社会性昆虫一样, 进化出一系列对昆虫致病菌的行为和生理抗性; 另一方面, 昆虫致病菌在黄野螟群体内的水平传递或能够促进传染。未来, 有必要进一步筛选对黄野螟高毒的菌株, 并开发能够促进群体内水平传递、抑制行为和生理抗性的剂型和复配配方。此外, 物理防治、栽培管理和抗性土沉香品系的开发均

有较好的应用前景，有望和生物防治、化学防治有机整合在一起，发展出因地制宜的黄野螟综合防控技术，减少化学农药的使用，解决沉香产品农药残留问题。

虽然有较多研究关注黄野螟的行为学、化学生态学和分子生物学，但仍有一些问题尚未解决。例如，黄野螟成虫的性信息素的确切成分尚未得到鉴定。尽管有一些花香物质和土沉香挥发物对黄野螟成虫具有电生理活性和吸引作用，但尚未实现在自然条件下大量诱杀成虫。此外，黄野螟一些特殊行为模式（如幼虫聚集行为）的化学生态和分子生物学机制尚未阐明，未来值得进一步研究。RNA 生物农药因其高度的物种专一性和低环境残留得到了广泛关注（Christiaens *et al.*, 2021; 李琳红等, 2024）。值得注意的是，黄野螟一系列重要基因的功能已得到深入研究，在此基础上进一步开发 RNA 生物农药，将有望实现对黄野螟的无公害防治。

### 参考文献 (References)

- Barman HK, Nath RK. Pathogenicity of entomopathogenic fungi, *Beauveria bassiana* on *Heortia vitessoides*, a major insect pest of *Aquilaria agallocha* in Assam [J]. *Pathogenicity of Entomopathogenic Fungi*, 2002, 8 (2): 79-80.
- Brunner-Mendoza C, Reyes-Montes MR, Moonjely S, *et al.* A review on the genus *Metarhizium* as an entomopathogenic microbial biocontrol agent with emphasis on its use and utility in Mexico [J]. *Biocontrol Science and Technology*, 2019, 29 (1): 83-102.
- Cao CL, Zheng LF, Li YZ, *et al.* A method used for distinguishing the pupae sexuality of *Heortia vitessoides* [J]. *China Forestry Science and Technology*, 2013, 27 (2): 121-122. [曹春雷, 郑礼飞, 李奕震, 等. 一种鉴定土沉香黄野螟雌雄蛹的方法 [J]. 林业科技开发, 2013, 27 (2): 121-122]
- Chen JX, Lyu ZH, Wang CY, *et al.* RNA interference of a trehalose-6-phosphate synthase gene reveals its roles in the biosynthesis of chitin and lipids in *Heortia vitessoides* (Lepidoptera: Crambidae) [J]. *Insect Science*, 2020, 27 (2): 212-223.
- Chen QL, Sun MX, Wang HY, *et al.* Characterization of Chitin Synthase B Gene (*HvChsb*) and the Effects on Feeding Behavior in *Heortia vitessoides* Moore [J]. *Insects*, 2023a, 14 (7): 608.
- Chen RH, Zheng W, Tian LY, *et al.* Indoor toxicity test of six insecticides against larvae of different instars of *Heortia vitessoides* [J]. *Tropical Forestry*, 2023, 51 (1): 92-96. [陈人豪, 郑伟, 田乐宇, 等. 6种药剂对黄野螟不同龄期幼虫的室内毒力测定 [J]. 热带林业, 2023, 51 (1): 92-96]
- Chen Y, Zhou GY, Chen GD, *et al.* Comparative analysis of metabolites in different resistant plants of *Aquilaria sinensis* [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2024, 46 (4): 988-997. [陈彧, 周国英, 陈国德, 等. 白木香不同抗黄野螟植株代谢物质对比分析 [J]. 环境昆虫学报, 2024, 46 (4): 988-997]
- Chen YY, Liang SH, Wang SY, *et al.* Repeated mechanical damage enhanced *Aquilaria sinensis* resistance to *Heortia vitessoides* through jasmonic acid [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023b, 14: 1183002.

- Chen ZY, Li DW, Wang L, *et al.* Studies on biological characteristics of *Heortia vitessoides* Moore on *Aquilaris sinensis* [J]. *China Plant Protection*, 2011, 31 (11): 10-14. [陈志云, 李东文, 王玲, 等. 土沉香黄野螟生物学特性研究 [J]. 中国植保导刊, 2011, 31 (11): 10-14]
- Cheng J, Chen JX, Lin T. De novo assembly and analysis of the *Heortia vitessoides* transcriptome via high-throughput Illumina sequencing [J]. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 2017, 20 (4): 1241-1248.
- Cheng J, Wang CY, Lyu ZH, *et al.* Candidate olfactory genes identified in *Heortia vitessoides* (Lepidoptera: Crambidae) by antennal transcriptome analysis [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part D: Genomics and Proteomics*, 2019, 29: 117-130.
- Cheng J, Wang CY, Lyu ZH, *et al.* Identification and characterization of the catalase gene involved in resistance to thermal stress in *Heortia vitessoides* using RNA interference [J]. *Journal of Thermal Biology*, 2018b, 78: 114-121.
- Cheng J, Wang CY, Lyu ZH, *et al.* Induced expression of three heat shock proteins mediated by thermal stress in *Heortia vitessoides* (Lepidoptera: Crambidae) [J]. *Entomological Research*, 2018a, 48 (5): 416-426.
- Cheng J, Wang CY, Lyu ZH, *et al.* Multiple glutathione S-transferase genes in *Heortia vitessoides* (Lepidoptera: Crambidae): Identification and expression patterns [J]. *Journal of Insect Science*, 2018c, 18 (3): 23.
- Christiaens O, Sweet J, Dzhambazova T, *et al.* Implementation of RNAi-based arthropod pest control: Environmental risks, potential for resistance and regulatory considerations [J]. *Journal of Pest Science*, 2022, 95 (1): 1-15.
- Gao JJ, Zhang X, Guo Y, *et al.* Research on the optimized pest image instance segmentation method based on the Swin Transformer model [J]. *Journal of Nanjing Forestry University Natural Science Edition*, 2023, 47 (3): 1-10. [高家军, 张旭, 郭颖, 等. 融合 Swin Transformer 的虫害图像实例分割优化方法研究 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2023, 47 (3): 1-10]
- Hashim YZHY, Kerr PG, Abbas P, *et al.* *Aquilaria* spp. (agarwood) as source of health beneficial compounds: A review of traditional use, phytochemistry and pharmacology [J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2016, 189: 331-360.
- Huang JQ, Wei JH, Zhang Z, *et al.* Historical records and modern studies on agarwood production method and overall agarwood production method [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2013, 38 (3): 302-306. [黄俊卿, 魏建和, 张争, 等. 沉香结香方法的历史记载、现代研究及通体结香技术 [J]. 中国中药杂志, 2013, 38 (3): 302-306]
- Huang ZJ, Yuan PY, Xie WL, *et al.* Effect of group size on the survival and growth of *Heortia vitessoides* Moore (Lepidoptera: Pyralidae) [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2022, 44 (4): 1037-1042. [黄志嘉, 苑鹏宇, 谢伟龙, 等. 黄野螟群体大小对幼虫个体生存和发育的影响 [J]. 环境昆虫学报, 2022, 44 (4): 1037-1042]
- Jin XF, Ma T, Chang MS, *et al.* Aggregation and feeding preference of gregarious *Heortia vitessoides* (Lepidoptera: Crambidae) larvae to *Aquilaria sinensis* (Thymelaeaceae) [J]. *Journal of Entomological Science*, 2016, 51 (3): 209-218.

- Kuntadi K, Irianto RSB, Andadari L. Dynamic infestation of herbivorous caterpillar of *Heortia vitessoides* Moore (Lepidoptera: Crambidae) on agarwood plantation in Carita Forest Research Station, Province of Banten [J]. *Jurnal Penelitian Hutan Tanaman*, 2016, 13 (2): 83-93.
- Law STS, Nong W, So WL, *et al.* Chromosomal-level reference genome of the moth *Heortia vitessoides* (Lepidoptera: Crambidae), a major pest of agarwood-producing trees [J]. *Genomics*, 2022, 114 (4): 110440.
- Li LH, Wang HB, Liang P. Research advances on RNA insecticides [J]. *Modern Pesticides*, 2024, 23 (4): 13-21. [李琳红,王海宝,梁沛.RNA 杀虫剂研究进展 [J].*现代农药*, 2024, 23 (4): 13-21]
- Li T, Zhao GX, Zhao DX, *et al.* Investigation of *Anthraco* and *Heortia vitessoides* on *Aquilaria sinensis* in Hekou of Yunnan [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2015, 42 (18): 63-67. [李涛, 赵国祥, 赵东兴, 等. 云南河口土沉香炭疽病、黄野螟调查研究 [J]. *广东农业科学*, 2015, 42 (18): 63-67]
- Li WH, Jia CJ, Chen HP, *et al.* Functional response of *Eocanthecona furcellata* (Wolff) to the larvae of *Heortia vitessoides* Moore [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2015, 37 (4): 843-848. [李文华, 贾彩娟, 陈惠平, 等. 叉角厉蝽对黄野螟幼虫的捕食功能反应 [J]. *环境昆虫学报*, 2015, 37 (4): 843-848]
- Li Z, Ye Q, Lyu Z, *et al.* RNA interference of eclosion hormone gene reveals its roles in the control of ecdysis behavior in *Heortia vitessoides* Moore [J]. *Archives of Insect Biochemistry and Physiology*, 2020, 105 (1): e21726.
- Li ZC, Liu L, Yang B, *et al.* Identification and analysis of chemosensory genes in *Heortia vitessoides* [J]. *Plant Protection*, 2021, 47 (6): 34-48. [李资聪, 刘磊, 杨斌, 等. 黄野螟化学感受基因的鉴定与分析 [J]. *植物保护*, 2021, 47 (6): 34-48]
- Liang SP, Cai JC, Chen X, *et al.* Larval aggregation of *Heortia vitessoides* Moore (Lepidoptera: Crambidae) and evidence of horizontal transfer of avermectin [J]. *Forests*, 2019, 10 (4): 331.
- Liang SP. Larval Aggregation Behavior of *Heortia vitessoides* and the Transmission of Insecticides and *Metarhizium anisopliae* within Larval Groups [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2021. [梁仕萍. 黄野螟幼虫聚集行为及杀虫剂和绿僵菌在幼虫群体中的传递 [D]. 广州: 华南农业大学, 2021]
- Liao YL, Xu MF, Wang JH. The complete mitochondria genome sequence of *Heortia vitessoides* Moore [J]. *Mitochondrial DNA Part B*, 2019, 4 (2): 4014-4015.
- Liu L, Zhang Y, Yan SC, *et al.* Ultrastructural and descriptive study on the adult body surface of *Heortia vitessoides* (Lepidoptera: Crambidae) [J]. *Insects*, 2023, 14 (8): 687.
- Liu ZX, Mo LJ, Ou W, *et al.* Effect of underforest intercropping on growth of *Aquilaria sinensis* and pest occurrence of *Heortia vitessoides* [J]. *South China Forestry Science*, 2018, 46 (2): 35-37. [刘志贤, 莫罗坚, 欧薇, 等. 林下套种对土沉香生长及黄野螟危害的影响分析 [J]. *南方林业科学*, 2018, 46 (2): 35-37]



- Lu SJ, Wei YC, Huang WP, *et al.* The development of agarwood industry in China and ASEAN Countries: Current situation, issues and countermeasures [J]. *Journal of Guangxi Agriculture*, 2023, 38 (3): 100-105. [卢诗剑, 韦勇聪, 黄卫萍, 等. 中国与东盟国家沉香产业发展现状 [J]. 广西农学报, 2023, 38 (3): 100-105]
- Lyu ZH, Chen J, Li ZX, *et al.* Knockdown of  $\beta$ -N-acetylglucosaminidase gene disrupts molting process in *Heortia vitessoides* Moore [J]. *Archives of Insect Biochemistry and Physiology*, 2019a, 101 (4): e21561.
- Lyu ZH, Li ZX, Cheng J, *et al.* Suppression of gene juvenile hormone diol kinase delays pupation in *Heortia vitessoides* Moore [J]. *Insects*, 2019b, 10 (9): 278.
- Ma DY, Li BP, Gao WS, *et al.* Effect of a short-term cold storage to different development effect of a short-term cold storage to different development [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2004, 3: 215-217. [马德英, 李保平, 高卫时, 等. 短期冷藏对不同品系暗黑赤眼蜂的影响 [J]. 中国生物防治, 2004, 3: 215-217]
- Ma HM. Studies on Agar Forming Mechanism of *Aquilaria sinensis* (Lour.) Gilg [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2013. [马华明. 土沉香 (*Aquilaria sinensis* (Lour.) Gilg) 结香机制的研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013]
- Ma TH. Effect of Landscape Pattern on the Occurrence of *Heortia vitessoides* in *Aquilaria sinensis* Forest [D]. Changshang: Central South University of Forestry and Technology, 2022. [麻天豪. 黄野螟对土沉香人工林景观格局的响应研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2022]
- Ma WS. Identification of Insect Pathogenic Fungi and Evaluation of Their Potential for Controlling Two Medicinal Plant Pests [D]. Beijing: Peking Union Medical College, 2012. [马维思. 昆虫病原真菌分离鉴定及其对两种药材害虫防治潜力评价 [D]. 北京: 北京协和医学院, 2012]
- Mao YT, Zhang M, Jin XF, *et al.* Study on resistance of *Aquilaria sinensis* against *Heortia vitessoides* [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2017, 38 (6): 89-96. [茅裕婷, 张蒙, 靳秀芳, 等. 土沉香对黄野螟的抗性研究 [J]. 华南农业大学学报, 2017, 38 (6): 89-96]
- Pan ZJ, Wen C, Liu CH, *et al.* Fine structure of the compound eyes of male and female *Heortia vitessoides* Moore (Lepidoptera: Crambidae) [J]. *Microscopy and Microanalysis*, 2023, 29 (2): 786-794.
- Pang SJ, Feng CL. A climbing prevention structure for controlling the damage of *Heortia vitessoides* larvae to *Aquilaria sinensis*: CN 109362433 A [P]. 2019.02.22. [庞圣江, 冯昌林. 一种防治黄野螟幼虫危害白木香的防攀爬结构: CN 109362433 A [P]. 2019.02.22]
- Peng SY, Zhao PF, Chang MS, *et al.* Behavior characteristics of *Heortia vitessoides* larva and its control [J]. *Guangxi Forestry Science*, 2022, 51 (2): 280-284. [彭思颖, 赵鹏飞, 常明山, 等. 黄野螟幼虫行为学特性及其防治 [J]. 广西林业科学, 2022, 51 (2): 280-284]

- Prathapan KD, Santhoshkumar T. First report of infestation of the agar defoliator *Heortia vitessoides* (Moore) on the agar wood tree *Aquilaria malaccensis* Benth. in South India [J]. *Indian Journal of Entomology*, 2023, 85 (3): 654-656.
- Qian CY, Ma T, Qiu HL, *et al.* Lethal, transmission, behavioral, and physiological effects of *Metarhizium anisopliae* against gregarious larvae of *Heortia vitessoides* and synergistic effects between *Metarhizium anisopliae* and insecticides [J]. *Pest Management Science*, 2023, 79 (6): 2191-2205.
- Qian CY, Su ZQ, Wen XJ, *et al.* Morphology and ultrastructure of the sex pheromone gland of lepidopteran pest *Heortia vitessoides* [J]. *Journal of Plant Protection*, 2024, 51 (2): 467-474. [钱沉鱼, 苏钟琪, 温秀军, 等. 黄野螟性信息素分泌腺形态及超微结构 [J]. 植物保护学报, 2024, 51 (2): 467-474]
- Qian CY, Wen C, Guo XL, *et al.* Gregariousness in lepidopteran larvae [J]. *Insect Science*, 2024a, 31 (5): 1353-1364.
- Qian CY, Xie WQ, Su ZQ, *et al.* Quantitative analysis and characterization of floral volatiles, and the role of active compounds on the behavior of *Heortia vitessoides* [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024b, 15: 1439087.
- Qiao HL, Lu PF, Chen J, *et al.* Antennal and behavioural responses of *Heortia vitessoides* females to host plant volatiles of *Aquilaria sinensis* [J]. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 2012, 143 (3): 269-279.
- Qiao HL, Lu PF, Chen J, *et al.* Biological characteristics and occurrence patterns of *Heortia vitessoides* [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2013, 50 (5): 1244-1252. [乔海莉, 陆鹏飞, 陈君, 等. 黄野螟生物学特性及发生规律研究 [J]. 应用昆虫学报, 2013, 50 (5): 1244-1252]
- Qiao HL, Lu PF, Liu S, *et al.* Ultrastructure observations on antennal sensilla of *Heortia vitessoides* the most serious pest of *Aquilaria sinensis* [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2019, 44 (10): 2026-2031. [乔海莉, 陆鹏飞, 刘赛, 等. 白木香重要害虫黄野螟的触角感器超微结构研究 [J]. 中国中药杂志, 2019, 44 (10): 2026-2031]
- Qiao HL, Lu PF, Liu S, *et al.* Volatiles from *Aquilaria sinensis* damaged by *Heortia vitessoides* larvae deter the conspecific gravid adults and attract its predator *Cantheconidea concinna* [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8 (1): 15067.
- Qiao HL, Xu CQ, Xu R, *et al.* Evaluation of efficiency of traps baited with frequency trembler grid lamps and trap plants for control *Heortia vitessoides* infectwed in *Aquilaria sinensis* [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2016, 41 (11): 2025-2029. [乔海莉, 徐常青, 徐荣, 等. 杀虫灯与诱集植物联合防控白木香黄野螟效果研究 [J]. 中国中药杂志, 2016, 41 (11): 2025-2029]
- Qiao HL, Xu CQ, Zhou YK, *et al.* Research on the use of insecticidal lamps for controlling *Heortia vitessoides* [J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2017, 40 (9): 2026-2029. [乔海莉, 徐常青, 周亚奎, 等. 应用杀虫灯防治白木香黄野螟技术研究 [J]. 中药材, 2017, 40 (9): 2026-2029]
- Qiu Q, Yang DJ, Liu JM, *et al.* Control experiments of 5 insecticides on *Heortia vitessoides* Larvae [J]. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2019, 40 (1): 59-60, 91. [邱琼, 杨德军, 刘际梅, 等. 5种药剂对黄野螟幼虫的林间防治试验 [J]. 四川林业科技, 2019, 40 (1): 59-60, 91]

- Rahman I. Biology of *Heortia vitessoides* Moore, a major insect pest of *Aquilaria Malaccensis* Lamk in northeast India [J]. *Indian Journal of Entomology*, 2018, 80 (4): 1725-1728.
- Sajap AS. Notes on *Heortia vitessoides* (Moore) (Lepidoptera: Crambidae: Odontiinae), an economically potential pest of *Aquilaria malaccensis* Benth in Malaysia [J]. *Serangga*, 2013, 18 (1): 55-62.
- Sha LH, Xu JH, Chen L, *et al.* Investigation on species and occurrence of pests in main planting areas of Hainan [J]. *World Journal of Forestry*, 2018, 7 (3): 90-93. [沙林华, 徐建辉, 陈琳, 等. 海南沉香主要种植区害虫种类及发生情况调查 [J]. 林业世界, 2018, 7 (3): 90-93]
- Sondhi Y, Sondhi S, Pathour SR, *et al.* Moth diversity (Lepidoptera: Heterocera) of Shendurney and Ponnudi in Agastiyamalai Biosphere Reserve, Kerala, India, with notes on new records [J]. *Tropical Lepidoptera Research*, 2018, 28 (2).
- Su HR, Wang TF, Wen P, *et al.* Localization of the sex pheromone source in agarwood defoliator *Heortia vitessoides* Moore [J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2023, 51 (1): 139-142. [苏浩然, 王同飞, 文平, 等. 沉香暴食害虫黄野螟性信息素分泌源EAG和GC-MS分析 [J]. 安徽农业科学, 2023, 51 (1): 139-142]
- Su YP. Biological characteristics of *Heortia vitessoides* Moore [J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 1994, 17 (12): 7-9. [苏跃平. 白木香黄野螟生物学特性 [J]. 中药材, 1994, 17 (12): 7-9]
- Syazwan SA, Lee SY, Ong SP, *et al.* Damaging insect pests and diseases and their threats to agarwood tree plantations [J]. *Sains Malaysiana*, 2019, 48 (3): 497-507.
- Tan ZQ, Zhang RY. Identification of a pathogen on Lepidoptera [J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2005, (6): 27-28, 31. [谭志琼, 张荣意. 一种鳞翅目昆虫致病菌的鉴定 [J]. 热带农业科学, 2005, (6): 27-28, 31]
- Tang LP. The Study on Attraction of Volatile Compounds from the Three Flowers Aroma to *Heortia vitessoides* [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2019. [唐丽萍. 3种植物花香挥发物成分分析及其对黄野螟的引诱研究 [D]. 广州: 华南农业大学, 2019]
- Tian YH, Yuan HF, Ni SB, *et al.* Advances in studies on endangered *Aquilaria* Plant [J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2009, 17 (1): 98-104. [田耀华, 原慧芳, 倪书邦, 等. 沉香属植物研究进展 [J]. 热带亚热带植物学报, 2009, 17 (1): 98-104]
- Wang CY, Cheng J, Lyu ZH, *et al.* Chitin deacetylase 1 and 2 are indispensable for larval-pupal and pupal-adult molts in *Heortia vitessoides* (Lepidoptera: Crambidae) [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 2019, 237: 110325.
- Wang HY, Sun MX, Liu N, *et al.* Unraveling the Role of Cuticular Protein 3-like (*HvCP3L*) in the Chitin Pathway through RNAi and Methoxyfenozide Stress Response in *Heortia vitessoides* Moore [J]. *Insects*, 2024, 15 (5): 362.

- Wang L, Zheng LF, Chen ZY, *et al.* Studies on the synergistic effects of Emamectin-benzoate and *Bacillus thuringiensis* on *Heortia vitessoides* Moore [J]. *Journal of Shandong Forestry Science and Technology*, 2012, 42 (1): 37-38. [王玲, 郑礼飞, 陈志云, 等. 甲维盐与苏云金杆菌复配对黄野螟增效作用研究 [J]. 山东林业科技, 2012, 42 (1): 37-38]
- Wang X, Lin SC, Xian SQ, *et al.* Study on parasitism habit of *Trichogramma evanescens* in *Heortia vitessoides* Eggs [J]. *Forestry and Environmental Science*, 2022b, 38 (3): 94-100. [王祥, 林思诚, 冼世庆, 等. 广赤眼蜂寄生黄野螟卵的习性研究 [J]. 林业与环境科学, 2022b, 38 (3): 94-100]
- Wang X, Xiao N, Lin SC, *et al.* Investigation on the effect of controlling *Heortia vitessoides* with *Hierodula patellifera* [J]. *Hunan Forestry Science and Technology*, 2022a, 49 (2): 44-48. [王祥, 肖宁, 林思诚, 等. 利用广斧螳控制黄野螟效果调查 [J]. 湖南林业科技, 2022a, 49 (2): 44-48]
- Wang Z, Xie WZ, Zhu CQ, *et al.* Circadian rhythm of emergence and reproduction of *Heortia vitessoides* Moore (Lepidoptera:Crambidae) [J]. *Forest Pest and Disease*, 2018, 37 (1): 24-27, 30. [王忠, 谢伟忠, 朱诚棋, 等. 黄野螟的羽化和生殖行为节律 [J]. 中国森林病虫, 2018, 37 (1): 24-27, 30]
- Wen YZ, Jin XF, Zhu CQ, *et al.* Effect of substrate type and moisture on pupation and emergence of *Heortia vitessoides* (Lepidoptera: Crambidae): Choice and no-choice studies [J]. *Journal of Insect Behavior*, 2016, 29: 473-489.
- Wen YZ, Qin WQ, Chen X, *et al.* Soil moisture effects on pupation behavior, physiology, and morphology of *Heortia vitessoides* (Lepidoptera: Crambidae) [J]. *Journal of Entomological Science*, 2017, 52 (3): 229-238.
- Wen YZ. Study on the Pupation and Emergence Behaviors of *Heortia vitessoides* (Lepidoptera: Crambidae) [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2017. [文玉珍. 黄野螟化蛹行为及影响因素的研究 [D]. 广州: 华南农业大学, 2017]
- Xian SQ, Wang X, Lin SC, *et al.* A new parasitic natural enemy against *Heortia vitessoides*: *Trichogramma evanescens* Westwood [J]. *Forest Pest and Disease*, 2021, 40 (6): 24-28. [冼世庆, 王祥, 林思诚, 等. 黄野螟的一种新寄生性天敌——广赤眼蜂 [J]. 中国森林病虫, 2021, 40 (6): 24-28]
- Xiao N, Lin SC, Wang X, *et al.* Investigation of natural enemies of *Heortia vitessoides* in Maoming, Guangdong Province [J]. *South China Agriculture*, 2020, 14 (27): 82-83. [肖宁, 林思诚, 王祥, 等. 茂名地区黄野螟天敌昆虫资源调查 [J]. 南方农业, 2020, 14 (27): 82-83]
- Xiao N, Wang X, Lin SC, *et al.* Study on selecting of natural enemy mantis of *Heortia vitessoides* [J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2021, 49 (12): 165-166, 189. [肖宁, 王祥, 林思诚, 等. 黄野螟天敌螳螂的筛选研究 [J]. 安徽农业科学, 2021, 49 (12): 165-166, 189]
- Xie WZ, Huang HH, Huang MJ, *et al.* Occurrence and control of forest pests in Guangdong Province [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2017, 39 (6): 1191-1197. [谢伟忠, 黄焕华, 黄茂俊, 等. 广东省林业有害生物的发生与防控 [J]. 环境昆虫学报, 2017, 39 (6): 1191-1197]

- Xu BQ, Song B, Xiong JM, *et al.* Field evaluation of unmanned aerial vehicle (UAV) as sprayer for chemical control of the main pests in jujube orchard [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2021, 43 (1): 245-252. [徐兵强, 宋博, 熊金铭, 等. 植保无人机喷雾对枣树主要害虫防治效果评价 [J]. 环境昆虫学报, 2021, 43 (1): 245-252]
- Xu DP, Li XY, Jin YW, *et al.* Influence of climatic factors on the potential distribution of pest *Heortia vitessoides* Moore in China [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 23: e01107.
- Yan Z, Yue JJ, Yang CY. Potential use of *Trichogramma pintoi* as a biocontrol agent against *Heortia vitessoides* (Lepidoptera: Pyralidae) [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2020, 113 (2): 654-659.
- Yan Z, Yue JJ, Zhang YY. Biotic and abiotic factors that affect parasitism in *Trichogramma pintoi* (Hymenoptera: Trichogrammatidae) as a biocontrol agent against *Heortia vitessoides* (Lepidoptera: Pyralidae) [J]. *Environmental Entomology*, 2023, 52 (3): 301-308.
- Yan Z, Yue JJ. Effects of temperature and supplementary foods on the development and fecundity of *Heortia vitessoides* [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2019, 40 (9): 1789-1795. [严珍, 岳建军. 温度及补充营养对黄野螟生长发育和繁殖的影响 [J]. 热带作物学报, 2019, 40 (9): 1789-1795]
- Yang X, Li G, Wang C. Evidence of cuticle chemicals of *Heortia vitessoides* (Lepidoptera: Crambidae) larvae influencing the aggregation behavior of conspecific larvae [J]. *Insects*, 2024, 15 (10): 746.
- Ye QY, Li ZX, Chen QL, *et al.* Fatty acid-binding protein gene is indispensable for molting process in *Heortia vitessoides* (Lepidoptera: Crambidae) [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2023, 22 (2): 495-504.
- Yuan JG, Zhou ZJ, Yang Z, *et al.* Fitness analysis of *Eocanthecona furcellata* fed on frozen-treated *Tenebrio molitor* pupae [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2024, 46 (4): 814-821. [苑金戈, 周子杰, 羊展, 等. 叉角厉蝽对冷冻饲料黄粉虫蛹的适应性研究 [J]. 环境昆虫学报, 2024, 46 (4): 814-821]
- Zhang M, Ma T, Zhu XJ, *et al.* Observation on the head and chemoreceptors of *Heortia vitessoides* Moore larvae [J]. *Forest Pest and Disease*, 2014, 33 (3): 1-4. [张蒙, 马涛, 朱雪娇, 等. 黄野螟幼虫头部化学感器电镜扫描观察 [J]. 中国森林病虫, 2014, 33 (3): 1-4]
- Zhang P, Li XF, Cui ZY, *et al.* Morphological, physiological, biochemical and molecular analyses reveal wounding-induced agarwood formation mechanism in two types of *Aquilaria sinensis* (Lour.) Spreng [J]. *Industrial Crops and Products*, 2022, 178: 114603.
- Zhang SN, Shen J, Mou J, *et al.* Extraction of female adult sex pheromone gland from *Heortia vitessoides* Moore using different isolation methods and identification of its compounds by GC-MS [J]. *The Journal of Hebei Forestry Science and Technology*, 2016, 3: 1-5. [张胜男, 沈婧, 牟静, 等. 不同方法提取黄野螟性信息素粗提物组分 GC-MS 分析 [J]. 河北林业科技, 2016, 3: 1-5]
- Zhang Z, Wei JH, Han XM, *et al.* The sesquiterpene biosynthesis and vessel-occlusion formation in stems of *Aquilaria sinensis* (Lour.) Gilg trees induced by wounding treatments without variation of microbial communities [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2014, 15 (12): 23589-23603.

- Zhao PF. Identification and Biological Characteristics of a Pathogenic Bacterium from *Heortia vitessoides* and Its Effect on the Physiological Indicators [D]. Nanning: Guangxi University, 2019. [赵鹏飞. 一种黄野螟幼虫致病菌鉴定、生物学特性及其对宿主生理指标的影响 [D]. 南宁: 广西大学, 2019]
- Zhou YK, Qiao HL, Lu LL, *et al.* Adult emergence and sex pheromone release rhythm of *Heortia vitessoides* [J]. *China Plant Protection*, 2019, 39 (10): 27-30, 60. [周亚奎, 乔海莉, 卢丽兰, 等. 黄野螟成虫羽化和性信息素释放节律研究 [J]. 中国植保导刊, 2019, 39 (10): 27-30, 60]
- Zhou YK, Qiao HL, Zhan QQ, *et al.* Occurrence and control of the disease and pests damage on *Aquilaria Siensis* in Hainan [J]. *Modern Chinese Medicine*, 2017, 19 (8): 1102-1105. [周亚奎, 乔海莉, 战晴晴, 等. 海南白木香主要病虫害发生与防治 [J]. 中国现代中药, 2017, 19 (8): 1102-1105]
- Zhou YK, Zhan QQ, Zhao XS, *et al.* Developmental threshold temperature and effective accumulative temperature of *Heortia vitessoides* in Hainan [J]. *China Plant Protection*, 2017, 37 (3): 46-48, 32. [周亚奎, 战晴晴, 赵祥升, 等. 海南白木香黄野螟发育起点温度和有效积温研究 [J]. 中国植保导刊, 2017, 37 (3): 46-48, 32]
- Zhu CQ, Wang Z, Xie WZ, *et al.* Effects of *Aquilaris sinensis* leaves on development and protective enzymes activity of *Heortia vitessoides* Moore larval [J]. *China Plant Protection*, 2017a, 37 (6): 19-23, 29. [朱诚棋, 王忠, 谢伟忠, 等. 3种白木香叶片对黄野螟幼虫生长发育和保护酶活性的影响 [J]. 中国植保导刊, 2017a, 37 (6): 19-23, 29]
- Zhu CQ, Zhang M, Ma T, *et al.* Resistance mechanism of *Aquilaria sinensis* against *Heortia vitessoides* Moore [J]. *Forest Pest and Disease*, 2017b, 36 (5): 5-8, 12. [朱诚棋, 张蒙, 马涛, 等. 土沉香对黄野螟抗性机理的初步研究 [J]. 中国森林病虫, 2017b, 36 (5): 5-8, 12]