美国白蛾成虫对三种幼树共有和特有活性挥发物的嗅觉反应*

张春文[1,2**] 马庆辉[3] 孟昭军[1,2***] 耿楠楠[1,2] 严善春[1,2]

（1. 东北林业大学林学院，哈尔滨 150040；2. 东北林业大学森林生态系统可持续经营教育部重点实验室，哈尔滨 150040；3. 辽宁省沙地治理与利用研究所，阜新 123000）

摘 要 【目的】明确2种寄主植物和1种非寄主植物共有和特有活性挥发物对美国白蛾 *Hyphantria cunea* 成虫嗅觉行为的作用，为开发防控美国白蛾植物源引诱剂和驱避剂提供线索。【方法】通过动态顶空法收集3种幼树植物挥发物，使用气相色谱-触角电位联用仪（GC-EAD）筛选和气相色谱-质谱联用仪（GC-MS）鉴定活性挥发物组分，利用Y型嗅觉仪测定美国白蛾成虫对不同浓度标准化合物的嗅觉反应。【结果】3种幼树共有活性挥发物为 *α*-蒎烯、1,3-二乙基苯、1,4-二乙基苯、对异丙基甲苯、3′-乙基苯乙酮和4′-乙基苯乙酮，水曲柳和长白落叶松特有活性挥发物为 *β*-水芹烯和3-蒈烯。其中0.1、1和100 μg/μL *β*-水芹烯和0.1 μg/μL 4′-乙基苯乙酮对未交尾雌蛾具有显著引诱作用，而0.01和100 μg/μL *α*-蒎烯及0.1 μg/μL对异丙基甲苯具有显著驱避作用；0.1、1和10 μg/μL *β*-水芹烯，1和100 μg/μL 3'-乙基苯乙酮及1,3-二乙基苯、10 μg/μL 1,4-二乙基苯对未交尾雄蛾具有显著引诱作用，而100 μg/μL *α*-蒎烯和0.01 μg/μL 1,4-二乙基苯具有显著驱避作用；0.01、0.1、1和10 μg/μL 3-蒈烯，1和100 μg/μL *α*-蒎烯，0.01 μg/μL 3′-乙基苯乙酮，0.01 μg/μL 1,3-二乙基苯和100 μg/μL 1,4-二乙基苯对已交尾雌蛾具有显著引诱作用，而10 μg/μL 3′-乙基苯乙酮，0.01和100 μg/μL 4′-乙基苯乙酮及100 μg/μL 1,3-二乙基苯具有显著驱避作用。【结论】3种幼树共有活性挥发物中，未交尾雌蛾对 *α*-蒎烯表现为负趋性；未交尾雄蛾对较高浓度的1,4-二乙基苯表现为正趋性，而对低浓度表现为负趋性；已交尾雌蛾对3′-乙基苯乙酮和1,3-二乙基苯表现为高浓度负趋性、低浓度正趋性，而对4′-乙基苯乙酮表现为负趋性。长白落叶松和水曲柳特有活性挥发物中，已交尾雌蛾对3-蒈烯和未交尾雌、雄蛾对 *β*-水芹烯均表现为正趋性。

关键词 美国白蛾；活性挥发物；GC-EAD/MS；Y型嗅觉仪；行为反应

Olfactory responses of fall webworm, *Hyphantria cunea* (Lepidoptera: Erebidae) to common and specific active volatiles in three tree species

ZHANG Chun-Wen[1,2**] MA Qing-Hui[3] MENG Zhao-Jun[1,2***]
GENG Nan-Nan[1,2] YAN Shan-Chun[1,2]

(1. College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. Key Laboratory of Sustainable Forest Ecosystem Management-Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;
3. Liaoning Institute of Sand Management and Utilization, Fuxin 123000, China)

Abstract **[Aim]** The fall webworm, *Hyphantria cunea* (Lepidoptera: Erebidae), is a significant pest affecting agriculture and forestry. The aim of this study was to investigate the effects of common and specific active volatiles from two host plants, *Fraxinus mandshurica* and *Ulmus pumila*, and one non-host plant, *Larix olgensis*, on the olfactory behavior of adult fall webworm moths. Our findings will assist the development of plant-derived attractants and repellents for the prevention and control of the fall webworm. **[Methods]** The dynamic headspace adsorption method was used to collect plant volatiles. The

*资助项目 Supported projects：国家十三五重点研发计划项目（2018YFC1200400）

**第一作者 First author，E-mail：zhangchunwen@yeah.net

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：mengzj2018@nefu.edu.cn

收稿日期 Received：2023-02-14；接受日期 Accepted：2023-12-01

active volatiles were identified using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) and gas chromatography coupled with electroantennogram detection (GC-EAD). A Y-tube olfactometer was used to measure the olfactory responses of adult fall webworm moths to different doses of standard compounds. **[Results]** Eight GC-EAD-active volatiles were identified. The specific active volatiles in *F. mandshurica* and *L. olgensis* were *β*-Phellandrene and 3-Carene, while the common active volatiles in the three tree species were *α*-Pinene, 1,3-Diethylbenzene, 1,4-Diethylbenzene, *p*-Cymene, 3'-Ethylacetophenone, and 4'-Ethylacetophenone. Of these, 0.1, 1, 100 μg/μL *β*-Phellandrene, and 0.1 μg/μL 4'-Ethylacetophenone had significant luring effects on unmated female fall webworm moths. Conversely, 0.01 and 100 μg/μL *α*-Pinene and 0.1 μg/μL *p*-Cymene had a significant repellent effect. There was a significant luring effect of 0.1, 1, 10 μg/μL *β*-Phellandrene, 1, 100 μg/μL 3'-Ethylacetophenone and 1,3-Diethylbenzene, and 10 μg/μL 1,4-Diethylbenzene on unmated males, while 100 μg/μL *α*-Pinene and 0.01 μg/μL 1,4-Diethylbenzene had a significant repellent effect. A significant luring effect was observed on mated females exposed to 0.01, 0.1, 1, 10 μg/μL 3-Carene, 1, 100 μg/μL *α*-Pinene, 0.01 μg/μL 3'-Ethylacetophenone, 0.01 μg/μL 1,3-Diethylbenzene and 100 μg/μL 1,4-Diethylbenzene. Whereas, 10 μg/μL 3'-Ethylacetophenone, 0.01, 100 μg/μL 4'-Ethylacetophenone, and 100 μg/μL 1,3-Diethylbenzene had a significant repellent effect. **[Conclusion]** Among the common active volatiles of the three tree species, unmated female moths showed a negative taxis response to *α*-Pinene. Unmated male moths displayed a positive taxis response to high concentrations of 1,4-Diethylbenzene but a negative taxis response to lower concentrations. Mated females showed a negative taxis response to 3'-Ethylacetophenone and 1,3-Diethylbenzene at high concentrations, and a positive taxis response to 4'-Ethylacetophenone at low concentrations. Within the specific active volatiles of *L. olgensis* and *F. mandshurica*, mated females exhibited a positive taxis response to 3-Carene, while unmated females and males showed a positive taxis response to *β*-Phellandrene.

Key words *Hyphantria cunea*; active volatiles; GC-EAD/MS; Y-tube olfactometer; behavioral response

美国白蛾 *Hyphantria cunea* 属鳞翅目 Lepidoptera 目夜蛾科 Erebidae（韩辉林，2019），是一种入侵性极强的国际性检疫害虫（陶萌萌等，2023）。自 1979 年在我国发现美国白蛾以来，疫情仍在持续扩散，截至 2022 年底已扩散至 14 个省（直辖市、自治区）的 614 个县级行政区，南已逾长江，北达吉林省长春市（国家林业和草原局，2023）。预计未来 20-40 年，美国白蛾有持续向东北地区扩散的趋势，届时黑龙江省将成为美国白蛾新的适生地区（刘枫等，2023），而黑龙江广泛栽培的水曲柳 *Fraxinus mandshurica* 和家榆 *Ulmus pumila* 等树种将成为美国白蛾潜在适生树种（杨丹等，2021；吕金言等，2023）。

目前防控美国白蛾主要以飞机喷洒无公害化学药剂为主，在发生面积大、危害严重的疫区具有很好的防治效果，但长期使用容易出现抗药性、环境污染和生物多样性破坏等问题（卢修亮等，2021；邱立新等，2022）。在植物与植食性昆虫互作中，植物挥发物（Volatile organic compounds，VOCs）可以调控昆虫行为，通过开发引诱剂、驱避剂可以改善化学杀虫剂带来的诸多问题（吕金言和孟昭军，2022）。目前，已有学者在寄主植物中筛选出一部分活性挥发物，例如李娜（2020）研究发现，桑树 *Morus alba*、洋白蜡 *Fraxinus pennsylvanica*、臭椿 *Ailanthus altissima*、家榆、国槐 *Sophora japonica*、金叶榆 *Ulmus pumila* cv. *Jinye*、金银木 *Lonicera maackii*、西府海棠 *Malus micromalus* 和美国梧桐 *Platanus occidentalis* 植物挥发物中特有的 2,4-二甲基-1-庚烯能引起美国白蛾触角电生理反应，在风洞研究中对不同生理状态的美国白蛾成虫均表现为引诱作用；马庆辉等（2021）研究发现水曲柳挥发物中 3-蒈烯也能引起美国白蛾雌蛾触角电生理反应，在风洞研究中也验证对未交尾和已交尾雌蛾具有引诱作用。因此，植物活性挥发物在未来生态防控美国白蛾具有重要的应用前景。

本研究选取黑龙江地区常见的 3 种绿化造林树种，即美国白蛾寄主树种水曲柳、家榆和非寄主树种长白落叶松 *Larix olgensis*。通过收集 3 种幼树植物挥发物，筛选及鉴定植物挥发物中的活性挥发物成分，再配制不同浓度的标准品，并测定不同生理状态（未交尾雌、雄蛾和已交尾雌

蛾）美国白蛾成虫对不同标准品的嗅觉行为反应。旨在明确 3 种幼树植物挥发物中共有和特有活性挥发物对美国白蛾的嗅觉行为活性，为开发美国白蛾植物源引诱剂和驱避剂提供线索。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫及幼树

美国白蛾卵由中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所提供。将初孵幼虫在温度（25±1）℃、光周期 14L∶10D 的人工气候培养箱（HPG-400HX，北京东联哈尔仪器制造有限公司）中使用人工饲料饲养至化蛹。幼虫化蛹后，根据蛹体形态特征将雌、雄蛹分别放在不同养虫盒中，羽化后饲喂 10%蜂蜜水的脱脂棉球。选取羽化后的未交尾雌、雄蛾及已交尾的雌蛾作为试验昆虫，行为试验前饥饿 1 d 处理。供试幼树为 3 年生水曲柳、长白落叶松和家榆，分别栽植于育苗盆（外径 30 cm，内径 28 cm，高 40 cm）中，定期水肥养护，试验时，选取无损伤、无病虫发生，且长势一致的幼树作为试验对象。

1.2 3 种幼树植物挥发物收集和活性挥发物筛选

通过动态顶空法收集 3 种幼树的植物挥发物。收集前，用 PE 采样袋（50 cm × 69 cm）罩住幼树枝叶部分并在茎部扎紧密封，先用大气采样仪（QC-1S，北京市劳动保护科学研究所）抽出袋内空气，再从采样袋底部通过 PVC 软管泵入活性炭过滤后的洁净空气，采样袋顶部连接玻璃吸附管（长 110 mm，内径 4 mm；填充 100 mg PoraPak Q 吸附剂，两端填充适量玻璃棉）形成气体循环，收集 4 h，结束后取下吸附管用正己烷（色谱纯，Fisher Chemical，USA）洗脱至 1 mL 进样瓶中，于 - 20 ℃条件下冷冻保存。

气相色谱-触角电位联用仪（GC-EAD）由气相色谱仪（7890A，Agilent Technologies, Inc.，USA）、HP-5 毛细色谱柱（30 m × 0.25 mm × 0.25 μm，J&W Scientific，USA）、FID 检测器、EAG Kombi 电极（PRG-3，Syntech，Germany）和信号记录控制器（IDAC-4，Syntech，Germany）等组成。GC 进样口温度设定 250 ℃，FID 温度设定 280 ℃。柱箱初始温度 50 ℃，升温程序由 5 ℃/min 升至 120 ℃，10 ℃/min 升至 250 ℃，后运行 280 ℃保持 5 min。测定时，通过激光微电极拉制仪（P-2000，Sutter Instrument Co.，USA）拉制玻璃毛细管（内径 0.9-1.1 mm、壁厚 0.1-0.15 mm，华西医科大学仪器厂）作为玻璃电极，使用 0.9%氯化钠溶液作为电解液。在体式显微镜下使用手术剪取下美国白蛾整根触角，并将少量触角端部切除，取 1 根玻璃电极，从尖部吸入约 2/3 的电解液，再用电极尖部吸住触角基部，电极尾端插在 EAG Kombi 参考电极金属头上，同时在 EAG Kombi 记录电极金属头上插入新玻璃电极。通过显微操作器（MP-15，Syntech，Germany）将触角尖端搭在记录电极尖端。在 GC-EAD 软件中观测 EAD 基线稳定后，手动 2 μL 不分流进样开始测定。测定后，记录触角有 EAD 反应的色谱峰保留时间，重复 5 次则标记该色谱峰为活性挥发物。

气相色谱-质谱联用仪（GC-MS）由装有 HP-5MS 毛细色谱柱（30 m × 0.25 mm × 0.25 μm，J&W Scientific，USA）的气相色谱仪（6890N，Agilent Technologies, Inc., USA）和质谱检测器（5975C，Agilent Technologies，Inc.，USA）组成。质谱检测器选用 EI 电子轰击电离模式（灯丝电压 70 eV），离子源温度设定 230 ℃，四级杆温度设定 150 ℃，扫描质量范围为 30-600 amu。GC 进样口、柱箱升温程序同 GC- EAD。样品测定时，手动 1 μL 不分流进样，测定后，通过 NIST11 谱库比对确定活性挥发物成分。

1.3 活性挥发物标准品配制

选用 3-蒈烯（CAS：13466-78-9，纯度≥90%，Sigma-Aldrich）、*α*-蒎烯（CAS：80-56-8，纯度≥98%，Sigma-Aldrich）、*β*-水芹烯（CAS：555-10-2，纯度≥99%，J&K Scientific）、3′-乙基苯乙酮（CAS：22699-70-3，纯度≥95%，J&K Scientific）、4′-乙基苯乙酮（CAS：937-30-4，纯度≥97%，Sigma-Aldrich）、1,3-二乙基苯（CAS：141-93-5，纯度≥98%，Sigma-Aldrich）、1,4-二乙基苯（CAS：105-05-5，纯度≥98%，Sigma-

Aldrich）、对异丙基甲苯（CAS：99-87-6，纯度≥99%，Sigma-Aldrich）等 8 种活性挥发物用于美国白蛾嗅觉行为试验。参考 Bai 等（2020）标准品的浓度梯度配制方法，分别用液体石蜡（分析纯，天津市富宇精细化工有限公司）配制成 0.01、0.1、1、10 和 100 μg/μL 5 个浓度标准品试剂，于 - 20 ℃条件冷冻保存。

1.4　美国白蛾对不同浓度活性标准品的嗅觉行为反应

通过 Y 型嗅觉仪（主臂和两侧臂长均为 25 cm，内径 5 cm）测定不同生理状态对美国白蛾对不同浓度标准品的嗅觉行为反应，方法参照狄贵秋等（2019）。本研究在无外光源的室内进行，在 Y 型管正前上方 50 cm 处放置 1 盏 11 W 红光灯作为室内唯一光源。测定前用软管（Clearflo® 70 型，NewAge Industries, Inc.，USA）连接 Y 型嗅觉仪各个部分，依次连接大气采样仪、活性炭管、味源瓶和 Y 型管，其中味源瓶与 Y 型管侧臂之间用纱网阻隔。测定时移取 10 μL 待测标准品均匀滴在对折滤纸条（0.4 cm×4 cm）上，之后放入一端味源瓶中作为处理组，另一端味源瓶中放入滴有等量液体石蜡的滤纸条作为对照。试验时大气采样仪空气流速设定为 0.5 L/min，气体流动方向由味源瓶向 Y 型管主臂口流动。每浓度标准品共分 4 次测定，每次测试 5 头美国白蛾，以此作为 1 次重复，共 3 次重复。每次试验后用无水乙醇进行擦拭清洁 Y 型管，用清水冲净后放入烘箱 80 ℃烘干。试验时引导美国白蛾从主臂口爬进 Y 型管，大约 5 min 后昆虫稳定时开始记录。若昆虫爬过 1/2 处理组或对照组侧臂时，则记录为选择处理组或对照组的虫数。反应率、选择率和选择系数（周丽梅等，2009；李明杰等，2021）计算公式如下：

反应率（%）=$[(A+B)/N]\times100$；

处理组选择率（%）=$[A/(A+B)]\times100$；

对照组选择率（%）=$[B/(A+B)]\times100$；

选择系数=$(A-B)/(A+B)$。

式中，A 表示选择处理组虫数，B 表示选择对照组虫数，N 为供试总虫数。

1.5　数据分析及统计方法

通过 GraphPad Prism 9 软件（GraphPad Software，USA）进行数据分析和图形绘制，使用卡方（χ^2）检验和 Fisher's 检验，分析不同生理状态美国白蛾成虫在嗅觉行为试验中选择率差异。数据以平均值±均值标准误（Mean±SEM）表示，在 α=0.05 水平上进行显著性检验，通过*（$P<0.05$）、**（$P<0.01$）和 ns（$P>0.05$）表示显著差异性。

2　结果与分析

2.1　3 种幼树活性挥发物组分筛选及鉴定

在 GC-EAD 试验结果中，美国白蛾成虫对 3 种幼树植物挥发物中的 8 种化合物具有强烈的电生理反应（图 1）。经 GC-MS 鉴定，3 种幼树植物挥发物可分为单萜、芳香烃和酮类化合物 3 类，其中单萜类化合物包括 *α*-蒎烯、*β*-水芹烯和 3-蒈烯，芳香烃化合物包括 1,3-二乙基苯、1,4-二乙基苯和对异丙基甲苯，酮类化合物包括 3'-乙基苯乙酮和 4'-乙基苯乙酮。3 类化合物中芳香烃类总含量最高，约占 90%以上。*β*-水芹烯和 3-蒈烯是水曲柳和长白落叶松植物挥发物中的特有成分，其余 6 种化合物均是 3 种幼树植物挥发物中的共有成分。

2.2　美国白蛾未交尾雌蛾对不同浓度活性挥发物标准品的嗅觉反应

美国白蛾未交尾雌蛾对 0.01 μg/μL（χ^2=5.952，$P<0.05$）和 100 μg/μL（χ^2=11.17，$P<0.01$）*α*-蒎烯分别表现为显著和极显著负趋性反应，选择率分别为 32.92%和 27.04%，表明 *α*-蒎烯对未交尾雌蛾具有一定驱避作用；对 0.1 μg/μL（χ^2=7.490，$P<0.01$）*β*-水芹烯表现为极显著正趋性反应，选择率为 69.10%；对 1 μg/μL（χ^2=4.604，$P<0.05$）、100 μg/μL（χ^2=3.998，$P<0.05$）*β*-水芹烯表现为显著正趋性反应，选择率分别为 65.18%和 63.24%，表明 *β*-水芹烯是引诱未交尾雌蛾的活性挥发物；对 0.1 μg/μL（χ^2=6.697，$P<0.01$）4′-乙基苯乙酮选择率极显著大于对照，选择率为 68.08%，表明 4′-乙基苯乙酮对未交尾雌

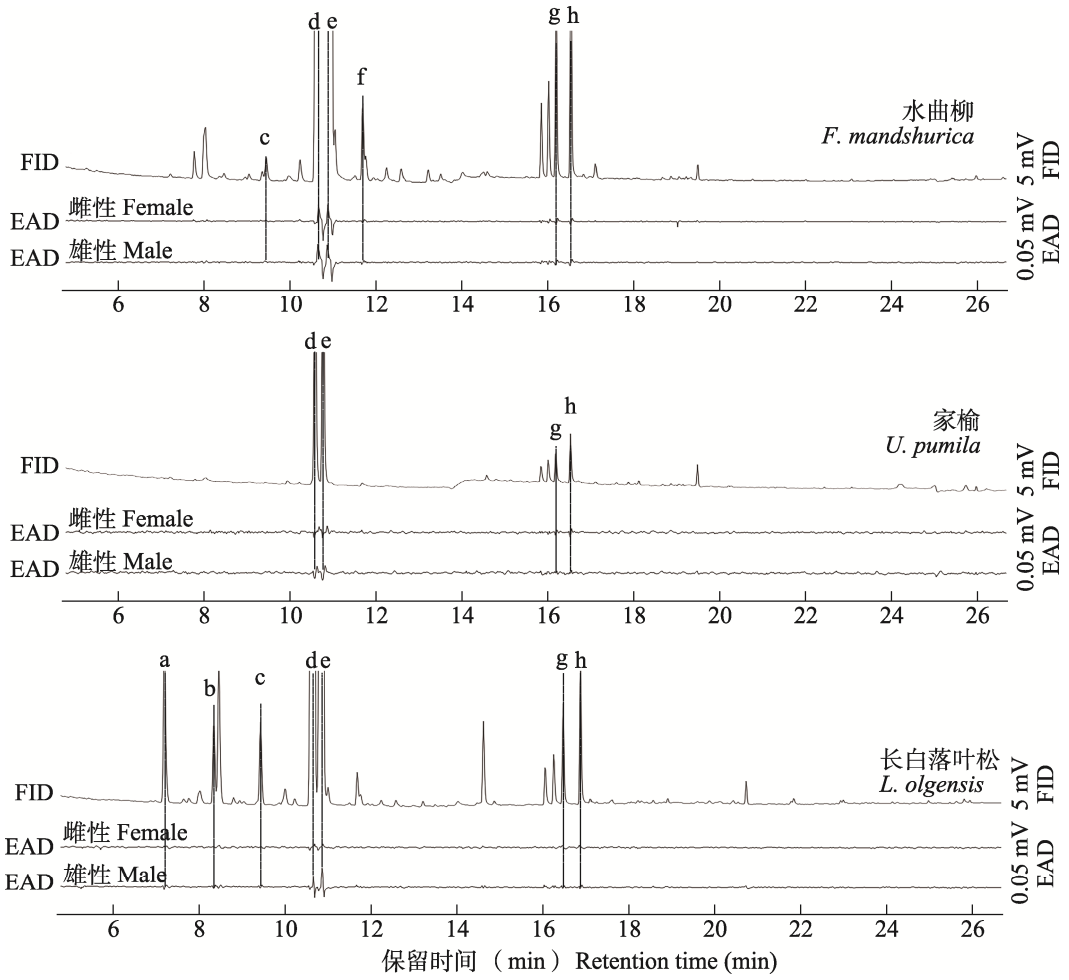

图 1 美国白蛾触角对植物挥发物 GC-EAD 的电生理反应

Fig. 1 GC-EAD responses of *Hyphantria cunea* antennae to the plant volatiles

a：*α*-蒎烯；b：*β*-水芹烯；c：3-蒈烯；d：1,3-二乙基苯；e：1,4-二乙基苯；f：对异丙基甲苯；g：3′-乙基苯乙酮；h：4′-乙基苯乙酮。

a: *α*-Pinene; b: *β*-Phellandrene; c: 3-Carene; d: 1,3-Diethylbenzene; e: 1,4-Diethylbenzene; f: *p*-Cymene; g: 3′-Ethylacetophenone; h: 4′-Ethylacetophenone.

蛾具有较大引诱作用；仅对 0.1 μg/μL（χ^2=4.604，P < 0.05）对异丙基甲苯具有显著负趋性反应，选择率为 35.65%，表明对异丙基甲苯对未交尾雌蛾具一定驱避作用（图 2）。

2.3 美国白蛾未交尾雄蛾对不同浓度活性挥发物标准品的嗅觉反应

美国白蛾未交尾雄蛾对 100 μg/μL（χ^2=11.17，P < 0.01）*α*-蒎烯具有极显著负趋性反应，选择率为 27.36%；对各个浓度 *β*-水芹烯选择率均大于对照，其中对 0.1 μg/μL（χ^2=14.50，P<0.01）、1 μg/μL（χ^2=7.490，P < 0.01）和 10 μg/μL（χ^2=9.227，P < 0.01）*β*-水芹烯均具有极显著正趋性反应，选择率分别为 75.91%、69.02%和 71.01%；对 1 μg/μL（χ^2=5.952，P<0.05）和 100 μg/μL（χ^2=7.490，P < 0.01）1,3-二乙基苯分别表现为显著、极显著正趋性反应，选择率分别为 67.08%和 68.52%，而对其他浓度无显著趋性作用；对 1 μg/μL（χ^2=3.998，P < 0.05）、100 μg/μL（χ^2=5.255，P < 0.05）3′-乙基苯乙酮表现为显著正趋性反应，选择率分别为 63.12%和 66.01%；对 1,4-二乙基苯具有双重趋性反应，10 μg/μL（χ^2=8.333，P < 0.01）时表现为极显著正趋性反应，选择率为 69.35%，而 0.01 μg/μL（χ^2=11.17，P < 0.01）时

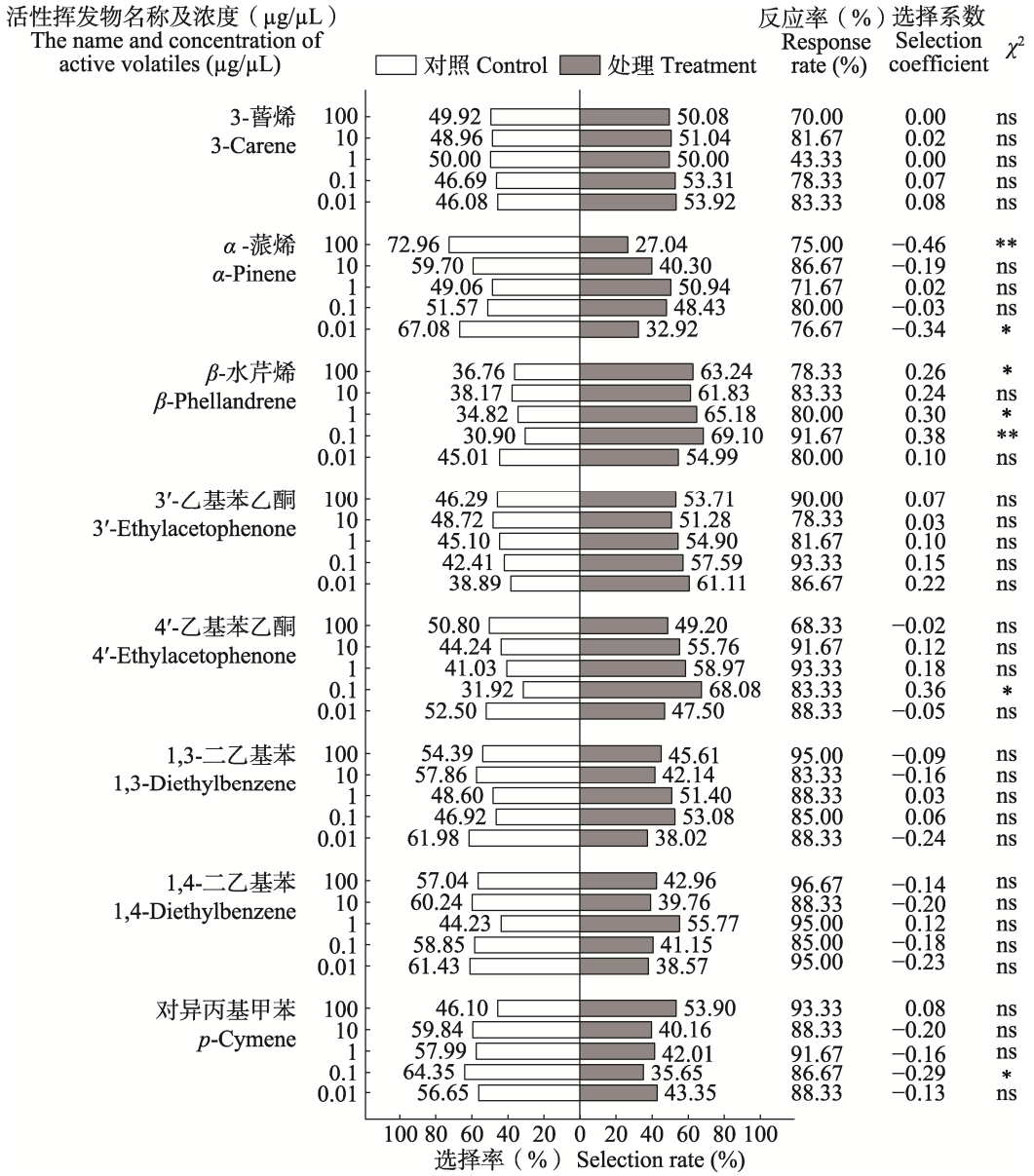

图 2　美国白蛾未交尾雌蛾对活性挥发物的嗅觉反应

Fig. 2　Olfactory responses of unmated female *Hyphantria cunea* to the active volatiles

采用卡方检验和 Fisher's 检验对美国白蛾反应率进行差异显著性分析，*表示为差异显著（$P < 0.05$），**表示为差异极显著（$P < 0.01$），ns 表示差异不显著（$P>0.05$）。选择系数为正数时表示该活性挥发物对美国白蛾具有引诱作用，为负数时表示具有驱避作用。下图同。

Chi-square test and Fisher's test was used to analyze the different significance of response rate of the *H.cunea*, * indicates significant difference at $P < 0.05$, ** indicates extremely significant difference at $P < 0.01$, ns indicates no significant difference. Selection coefficient for positive number means that active volatile is attractive to *H. cunea*, conversely, negative number indicates a repellent effect. The same below.

则表现为极显著负趋性反应，选择率为 27.11%。结果表明 β-水芹烯、3′-乙基苯乙酮和 1,3-二乙基苯对未交尾雄蛾有一定引诱作用，α-蒎烯则具有驱避作用，而 1,4-二乙基苯具高浓度引诱和低浓度驱避的双重作用，可能在美国白蛾未交尾雄蛾嗅觉行为反应中发挥重要的生态功能（图 3）。

2.4　美国白蛾已交尾雌蛾对不同浓度活性挥发物标准品的嗅觉反应

美国白蛾已交尾雌蛾对 0.01 μg/μL（χ^2=13.33，

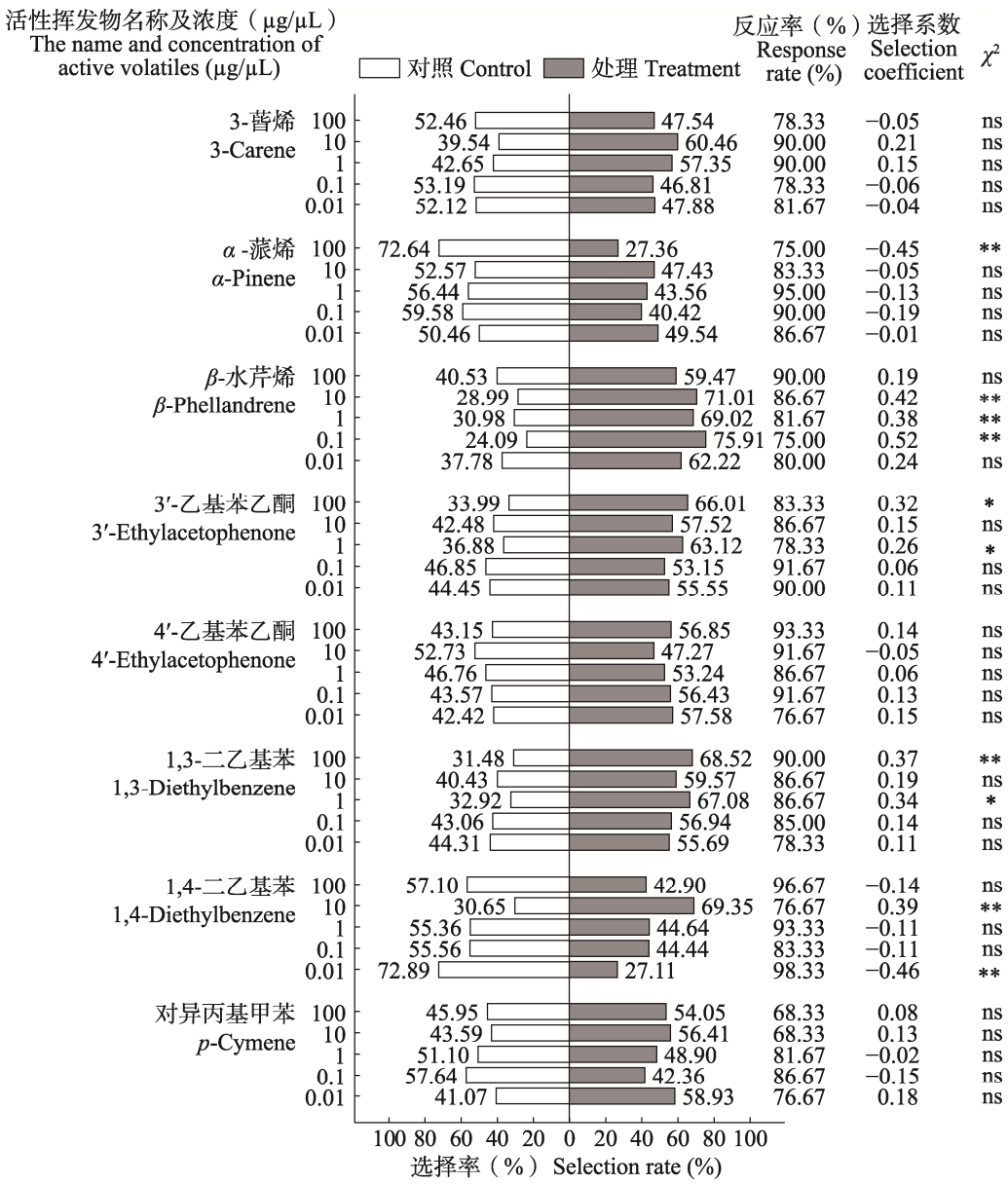

图 3 美国白蛾未交尾雄蛾对活性挥发物的嗅觉反应

Fig. 3 Olfactory responses of unmated male *Hyphantria cunea* to the active volatiles

$P < 0.01$）、0.1 μg/μL（χ^2=17.01，$P < 0.01$）、1 μg/μL（χ^2=17.01，$P < 0.01$）和 10 μg/μL（χ^2=7.490，$P < 0.01$）3-蒈烯均表现为极显著正趋性反应，选择率分别为 76.47%、76.47%、76.47%和 66.67%；对 1 μg/μL（χ^2=5.952，$P < 0.05$）和 100 μg/μL（χ^2=7.490，$P < 0.01$）α-蒎烯分别表现为显著和极显著正趋性反应，选择率均为 66.67%；对 3′-乙基苯乙酮具有双重趋性反应，0.01 μg/μL（χ^2=11.17，$P < 0.01$）表现为极显著正趋性反应，选择率为 73.68%，而 10 μg/μL（χ^2=8.333，$P < 0.01$）表现极显著负趋性反应，选择率为 31.25%；对 0.01 μg/μL（χ^2=5.952，$P < 0.05$）、100 μg/μL（χ^2=13.33，$P < 0.01$）4′-乙基苯乙酮分别表现为显著和极显著负趋性反应，选择率分别为 33.33%和 23.53%；对 100 μg/μL 1,4-二乙基苯（χ^2=5.952，P<0.05）表现为显著正趋性反应，选择率为 66.67%；对 1,3-二乙基苯具有双重趋性反应，0.01 μg/μL（χ^2=9.227，$P < 0.01$）时表现为极显著正趋性反应，选择率为 70.59%，而对 100 μg/μL（χ^2=4.604，$P < 0.05$）表现为显著负趋性反应，选择率为

35.29%。结果表明，已交尾雌蛾嗅觉行为反应中，3-蒈烯、α-蒎烯和 1,4-二乙基苯可能是具有重要引诱作用的活性挥发物，4'-乙基苯乙酮则是具有驱避作用的活性挥发物，而 1,3-二乙基苯、3'-乙基苯乙酮具有低浓度引诱和高浓度驱避的双重作用（图 4）。

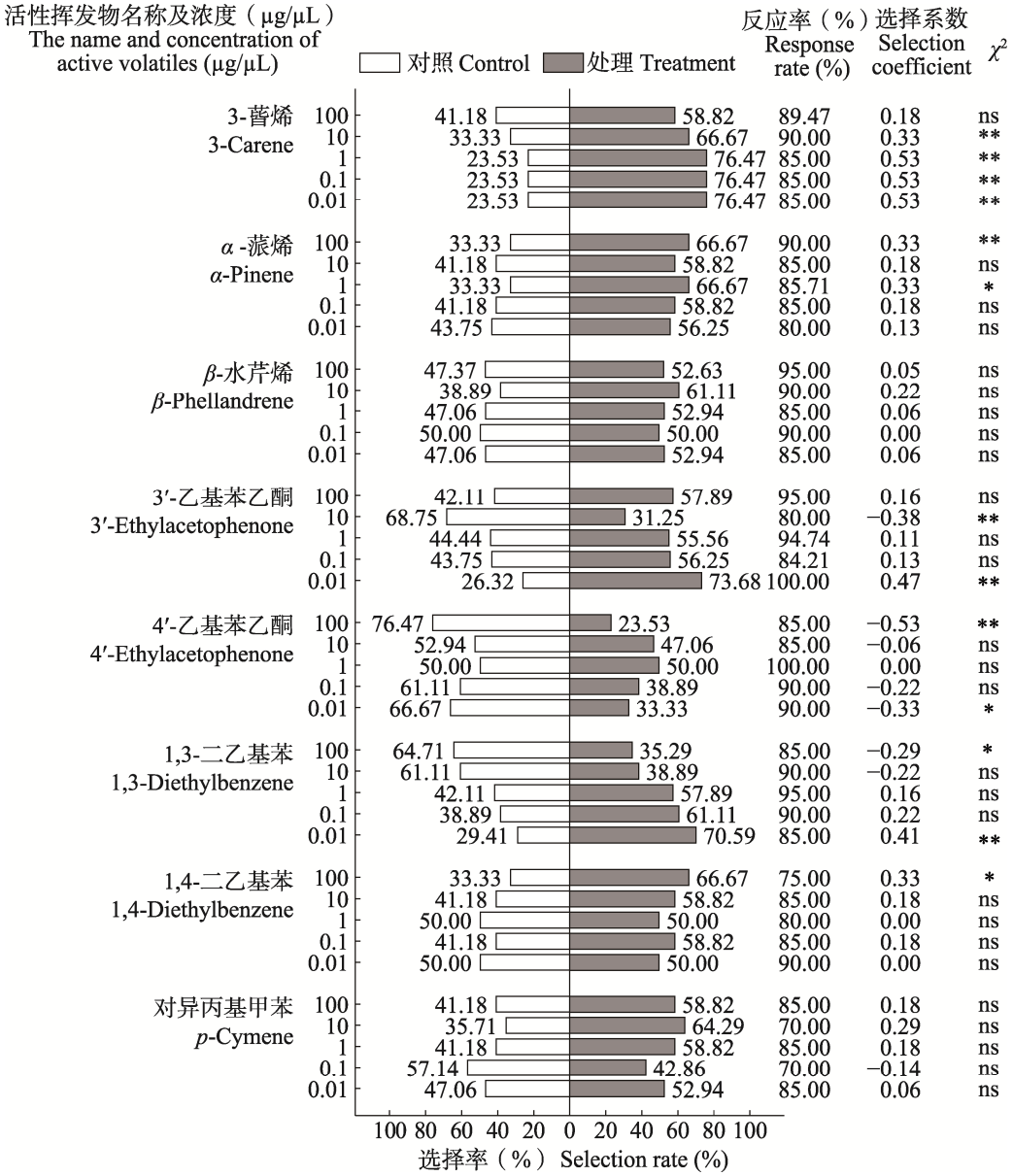

图 4　美国白蛾已交尾雌蛾对活性挥发物的嗅觉反应

Fig. 4　Olfactory responses of mated female *Hyphantria cunea* to the active volatiles

3　讨论

单萜类化合物 β-水芹烯在 0.1 和 1 μg/μL 时显著引诱美国白蛾未交尾雌、雄蛾，这个结果和其他鳞翅目昆虫研究相似，如兴安落叶松鞘蛾 *Coleophora obducta*、松瘿小卷蛾 *Cydia zebeana* 和松实小卷蛾 *Retinia cristata* 对 β-水芹烯具有同样的行为趋性（马惠芬等，2008；严善春等，2009；狄贵秋等，2019）。美国白蛾未交尾雌、雄蛾对 100 μg/μL α-蒎烯表现为显著负趋性，而已交尾雌蛾对 1 和 100 μg/μL α-蒎烯表现为显著正趋性。已知 α-蒎烯是长白落叶松、华北落叶松 *Larix*

principis-rupprechtii 和兴安落叶松 *Larix gmelinii* 挥发物的主要成分之一（陈大风等，2013），可能会引诱已交尾雌蛾飞往落叶松上进行产卵。美国白蛾已交尾雌蛾对 0.01、0.1、1 和 10 μg/μL 3-蒈烯均表现为显著正趋性，而未交尾雌、雄蛾对 3-蒈烯无显著趋性；同样的，华山松大小蠹 *Dendroctonus armandi*、横坑切梢小蠹 *Tomicus minor*、花绒寄甲 *Dastarcus helophoroides* 和桔小实蝇 *Bactrocera dorsalis* 等雌成虫对 3-蒈烯也具有显著的趋性反应（王茹琳等，2011；王红伟等，2014；Ren *et al.*, 2017；Gu *et al.*, 2022）。因此，3 种单萜类化合物对美国白蛾寄主选择具有一定影响，其中 *β*-水芹烯是引诱未交尾雌、雄蛾的组分，3-蒈烯是引诱已交尾雌蛾寻找寄主产卵的主要组分，而 *α*-蒎烯是驱避未交尾雌、雄蛾的主要组分。

芳香烃类化合物中未交尾雄蛾对 1 和 100 μg/μL 1,3-二乙基苯及 10 μg/μL 1,4-二乙基苯表现为显著正趋性；已交尾雌蛾对 0.01 μg/μL 1,3-二乙基苯和 100 μg/μL 1,4-二乙基苯表现为显著正趋性，而对 100 μg/μL 1,3-二乙基苯表现为显著负趋性。李琳等（2020）研究发现黄地老虎 *Agrotis segetum* 雌蛾对 1,4-二乙基苯表现为显著正趋性。本研究中仅有美国白蛾未交尾雌蛾对 0.1 μg/μL 对异丙基甲苯表现为显著负趋性，其他浓度对美国白蛾趋性行为均不显著，唐睿等（2012）也证实美国白蛾雌、雄蛾对对异丙基甲苯 EAG 反应值较低（< 17%）。因此，推测芳香烃化合物中仅有 1,3-二乙基苯和 1,4-二乙基苯是未交尾雄蛾寻找雌蛾和已交尾雌蛾寻找寄主产卵的重要线索。

酮类化合物中 0.1 μg/μL 4′-乙基苯乙酮引诱未交尾雌蛾，1 和 100 μg/μL 3′-乙基苯乙酮引诱雄蛾；而对 3′-乙基苯乙酮对已交尾雌蛾表现为低浓度（0.01 μg/μL）引诱和高浓度（10 μg/μL）驱避，4′-乙基苯乙酮对已交尾雌蛾表现为驱避。管维康等（2020）研究表明，3′-乙基苯乙酮和 4′-乙基苯乙酮是小叶榕 *Ficus concinna* 和垂叶榕 *Ficus benjamina* 植物挥发物中对朱红毛斑蛾 *Phauda flammans* 具有触角电位生理反应的活性挥发物，但行为研究中朱红毛斑蛾雌、雄蛾对 2 种化合物没有显著趋性反应；唐睿等（2012）研究发现苯乙酮是对美国白蛾未交尾雌、雄蛾具有触角电生理活性，但未开展行为反应研究。因此，推测这 2 种酮类化合物可能不是引诱美国白蛾的主要组分，其在一定浓度范围内可能起到引诱作用。

综上所述，不同生理状态的美国白蛾成虫对 3 种幼树不同浓度活性挥发物的行为反应存在一定差异。在未来，需将所筛选的活性挥发物混配研究，确定最佳浓度与比例，进行林间验证，为开发美国白蛾植物源引诱剂或驱避剂提供理论和技术支撑。此外，若能将植物源引诱剂与美国白蛾性信息素合理复配应用，将对生态防控美国白蛾具有重大现实意义。

参考文献 (References)

Chen DF, Li YJ, Kong XB, Zhang Z, Wang HB, Jiao XJ, Duan RL, Chen J, Li JF, 2013. Olfactory reception of conspecific aggregation pheromone and host volatile terpenes by asian larch bark beetle, *Ips subelongatus*. *Scientia Silvae Sinicae*, 49(11): 89–97. [陈大风, 李叶静, 孔祥波, 张真, 王鸿斌, 焦相杰, 段瑞龙, 陈洁, 李继峰, 2013. 落叶松八齿小蠹对聚集信息素和寄主挥发性萜烯成分的电生理响应. 林业科学, 49(11): 89–97.]

Bai PH, Wang HM, Liu BS, Li M, Liu BM, Gu XS, Tang R, 2020. Botanical volatiles selection in mediating electrophysiological responses and reproductive behaviors for the fall webworm moth *Hyphantria cunea*. *Frontiers in Physiology*, 11: 486.

Di GQ, Li J, Lu XH, Meng ZJ, Yan SC, 2019. Olfactory responses of *Cydia zebeana* adults and their parasitic wasps to larch volatiles. *Acta Ecologica Sinica*, 39(22): 8675–8683. [狄贵秋, 李杰, 卢旭弘, 孟昭军, 严善春, 2019. 松瘿小卷蛾及其寄生蜂对落叶松挥发物的嗅觉行为反应. 生态学报, 39(22): 8675–8683.]

Gu F, Ai SP, Chen YY, Jin S, Xie X, Zhang T, Zhong GH, Yi X, 2022. Mutualism promotes insect fitness by fungal nutrient compensation and facilitates fungus propagation by mediating insect oviposition preference. *The ISME Journal*, 16(7): 1831–1842.

Guan WK, Wang XY, Lu W, Zhang ZL, Zheng XL, 2020. Electrophysiological and behavioral responses of *Phauda flammans* to plant volatiles isolated from two *Ficus* species.

Journal of Forest and Environment, 40(4): 442–448. [管维康, 王小云, 陆温, 张志林, 郑霞林, 2020. 朱红毛斑蛾对榕树挥发物的触角电位及行为反应. 森林与环境学报, 40(4): 442–448.]

Han HL, 2019. Progress of taxonomy of Erebidae (part), Euteliidae, Nolidae and Noctuidae (Lepidoptera) in the Northeast China. *Journal of Environmental Entomology*, 41(6): 1181–1195. [韩辉林, 2019. 中国东北目夜蛾科（部分）、尾夜蛾科、瘤蛾科和夜蛾科（鳞翅目）分类学研究进展. 环境昆虫学报, 41(6): 1181– 1195.]

Li L, Xiu CL, Lu W, Lu YH, 2020. Electrophysiological and behavioral responses of *Agrotis segetum* adults to 15 plant volatiles. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 58(11): 2020–2027. [李琳, 修春丽, 路伟, 陆宴辉, 2020. 黄地老虎成虫对 15 种植物挥发物的电生理和行为反应. 新疆农业科学, 58(11): 2020–2027.]

Li MJ, Yu HY, Hu A, Wang WL, Wang SS, 2021. Identification and bioassay of components of the aggregation pheromones of *Protaetia brevitarsis* Lewis. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 58(4): 900–910. [李明杰, 于海洋, 胡安, 王威龙, 王少山, 2021. 白星花金龟聚集信息素的分离鉴定及引诱效果. 应用昆虫学报, 58(4): 900–910.]

Li N, 2020. Electrophysiological and behavioral responses of *Hyphantria Cunea* to several volatiles from 11 plants. Master dissertation. Beijing: Beijing Forestry University. [李娜, 2020. 美国白蛾对 11 种植物的挥发物的电生理及行为反应. 硕士学位论文. 北京: 北京林业大学.]

Liu F, Gong CQ, Li S, Chen YF, Zhou HW, 2023. Predicted future range of the fall webworm in China based on different climate scenarios *Chinese Journal of Applied Entomology*, 60(1):76–86. [刘枫, 公超群, 李硕, 陈怡帆, 周宏威, 2023. 基于不同气候情景的美国白蛾适生区预测. 应用昆虫学报, 60(1):76–86.]

Lu XL, Han FY, Wen XY, Qiu LX, Qu T, Chang GB, 2021. Analysis of the situation and countermeasure suggestions for the occurrence of *Hyphantria cunea*. *Forest Pest and Disease*, 40(1): 44–48. [卢修亮, 韩凤英, 温玄烨, 邱立新, 曲涛, 常国彬, 2021. 美国白蛾发生形势分析与对策建议. 中国森林病虫, 40(1): 44–48.]

Lv JY, Meng ZJ, 2022. The olfactory recognition mechanism of herbivore insects on plant volatiles: A review. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 38(15): 122–129. [吕金言, 孟昭军, 2022. 植食性昆虫嗅觉识别植物挥发物机制的研究进展. 中国农学通报, 38(15): 122–129.]

Lv JY, Tao MM, Zhang CW, Ye Y, Wu CD, Meng ZJ, Yan SC, 2023. Preferences of *Hyphantria cunea* for the leaves of eight widely planted main tree species in Heilongjiang, China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 60(1): 40–48. [吕金言, 陶萌萌, 张春文, 叶懿, 吴成丹, 孟昭军, 严善春, 2023. 美国白蛾对我国东北地区八种主要树种的选择及取食偏好性. 应用昆虫学报, 60(1): 40–48.]

Ma HF, Wang G, Yan ZL, Hu GH, Meng M, Feng ZW, 2008. Volatile components from fresh and weak needles of *Pinus kesiya* var. *langbianensis* and their influences on egg-laying of female *Retinia cristata*. *Journal of West China Forestry Science*, 37(2): 69–71, 81. [马惠芬, 王刚, 闫争亮, 胡光辉, 孟梦, 冯志伟, 2008. 思茅松针叶挥发性物质含量分析及其对松实小卷蛾雌蛾产卵行为的影响. 西部林业科学, 37(2): 69–71, 81.]

Ma QH, Wang K, Ren YJ, Zhang SM, Zhao JQ, Fang J, Meng ZJ, 2021. Electroantennogram and behavioral response of the adult *Hyphantria cunea* to active volatiles from *Fraxinus mandshurica*. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 52(6): 689–696. [马庆辉, 王楷, 任英杰, 张书曼, 赵佳齐, 方静, 孟昭军, 2021. 美国白蛾成虫对水曲柳活性挥发物的触角电位和行为反应. 沈阳农业大学学报, 52(6): 689–696.]

National Forestry and Grassland Administration, 2023. Announcement of the National Forestry and Grassland Administration (No.5, 2023), (*Hyphantria cunea* Epidemic Areas in 2023), 2023.2.17. [国家林业和草原局, 2023. 国家林业和草原局公告 (2023 年第 5 号), (2023 年美国白蛾疫区), 2023.2.17. https://www.forestry.gov.cn/search/380006]

Qiu LX, Lu XL, Lin X, Wen XY, Fan SQ, Shi Y, Chang GB, 2022. Discussion on the prevention and control process of *Hyphantria cunea* in China and strategies in the new period. *Forest Pest and Disease*, 41(6): 1–7. [邱立新, 卢修亮, 林晓, 温玄烨, 范世奇, 时勇, 常国彬, 2022. 我国美国白蛾防控历程与新时期策略探讨. 中国森林病虫, 41(6): 1–7.]

Ren LL, Balakrishnan K, Luo YQ, Schütz S, 2017. EAG response and behavioral orientation of *Dastarcus helophoroides* (Fairmaire) (Coleoptera: Bothrideridae) to synthetic host-associated volatiles. *PLoS ONE*, 12(12): e0190067.

Tang R, Su MW, Zhang ZN, 2012. Electroantennogram responses of an invasive species fall webworm (*Hyphantria cunea*) to host volatile compounds. *Chinese Science Bulletin*, 57(25): 2380–2389. [唐睿, 苏茂文, 张钟宁, 2012. 重大林业入侵害虫美国

白蛾对植物次生挥发物质的触角电位活性. 科学通报, 57(25): 2380–2389.]

Tao MM, Ma QH, Meng ZJ, Yan SC, 2023. Progress in the sustainable control of *Hyphantria cunea*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 60(1):13–22. [陶萌萌, 马庆辉, 孟昭军, 严善春, 2023. 美国白蛾绿色防控研究进展. 应用昆虫学报, 60(1): 13–22.]

Wang HW, Yang W, Yang H, Yang CP, Zhu XQ, Liu FJ, Jiang LH, Shan CY, 2014. Electroantennogram and behavioral responses of *Tomicus minor* (Hartig) (Coleoptera: Scolytidae) to plant volatiles. *Chinese Journal of Ecology*, 33(5): 1260–1266. [王红伟, 杨伟, 杨桦, 杨春平, 朱晓庆, 刘峰建, 蒋丽华, 山春燕, 2014. 横坑切梢小蠹对植物挥发物的电生理和行为反应. 生态学杂志, 33(5): 1260–1266.]

Wang RL, Yang W, Yang ZZ, Chen XP, Yang CP, Li Q, Li F, Chen CM, 2011. Electroantennographic and behavioral responses of *Dendroctonus armandi* (Coleoptera: Ipidae) to host plant volatiles. *Chinese Journal of Ecology*, 30(4): 724–729. [王茹琳, 杨伟, 杨佐忠, 陈小平, 杨春平, 李强, 李锋, 陈春茂, 2011. 华山松大小蠹对几种寄主挥发物组分的 EAG 和行为反应. 生态学杂志, 30(4): 724–729.]

Yan SC, Yang H, Gao LL, Wang ZB, Mao HB, 2009. Responses of *Coleophora obducta* to larch volatile compositions. *Scientia Silvae Sinicae*, 45(5): 94–101. [严善春, 杨慧, 高璐璐, 王志波, 毛洪波, 2009. 兴安落叶松鞘蛾对寄主挥发物的反应. 林业科学, 45(5): 94–101.]

Yang D, Tian BR, Xuan SJ, Ma QH, Meng ZJ, Yan SC, 2021. Adaptability of three tree species in Heilongjiang province to *Hyphantria cunea*. *Plant Protection*, 47(6): 153–157. [杨丹, 田博睿, 玄善姬, 马庆辉, 孟昭军, 严善春, 2021. 黑龙江省 3 种林木对美国白蛾的适生性. 植物保护, 47(6): 153–157.]

Zhou LM, Ju Q, Qu MJ, Zhao ZQ, Dong SL, Han ZJ, Yu SL, 2009. EAG and behavioral responses of the large black chafer, *Holotrichia parallela* (Coleoptera: Scarabaeidae) to its sex pheromone. *Acta Entomologica Sinica*, 52(2): 121–125. [周丽梅, 鞠倩, 曲明静, 赵志强, 董双林, 韩召军, 禹山林, 2009. 暗黑鳃金龟对性信息素的触角电生理及行为反应. 昆虫学报, 52(2): 121–125.]