

马尾松不同部位挥发物对松墨天牛 触角电位和行为反应的影响

王维招¹, 常明山^{1,2}, 赵鹏飞², 吴耀军², 向清东¹, 杨振德¹

¹广西大学林学院, 广西 南宁 530004; ²广西壮族自治区林业科学研究院,
广西林业有害生物天敌繁育工程技术研究中心, 广西 南宁 530002

摘要:【目的】探究马尾松健康植株不同位置挥发性物质, 比较其不同部位的挥发物的种类差异及含量, 分析松墨天牛成虫对健康马尾松各部位挥发物的触角电位反应和嗅觉反应, 为开展松墨天牛的行为调控技术提供依据。【方法】采用静态顶空法和气相色谱-质谱联用技术分析了马尾松松针、1 cm 枝条、5 cm 枝条、20 cm 树干、30 cm 树干、松油脂 6 个部位的挥发物, 并对松墨天牛雌雄成虫进行触角电位测定和行为反应观测。【结果】6 个部位的挥发物提取物中, 共检测出 36 种挥发性物质, 各部位挥发物种类相近, 相对含量差异较大, 但其主要挥发物均为萜烯类物质, 主要包括月桂烯、蒎烯、左旋-β-蒎烯、莰烯等。

在触角电位试验中, 5 cm 枝条挥发物提取物的触角电位值最高, 松油脂挥发物提取物的触角电位值最高; 在行为反应试验中, 各部位挥发物对松墨天牛成虫均有一定的引诱作用, 其中雌成虫对 5 cm 枝条挥发物提取物的趋向性最高, 雄成虫对 30 cm 树干和松油脂挥发物提取物的趋向性最高。【结论】健康状态下, 马尾松 5 cm 枝条及 30 cm 树干和松油脂中萜烯类挥发物制成的植物源引诱剂对松墨天牛两性成虫具有更好的引诱作用, 这将为提高现有的诱捕剂效果提供参考, 同时为松墨天牛虫害防治提供科学依据。

关键词: 马尾松; 松墨天牛; 挥发物; 触角电位; 行为选择



开放科学标识码
(OSID 码)

Effects of volatiles from different parts of *Pinus massoniana* on antennal potential and behavioral responses of *Monochamus alternatus*

WANG Weizhao¹, CHANG Mingshan^{1,2}, ZHAO Pengfei², WU Yaojun², XIANG Qingdong¹, YANG Zhende¹

¹College of Forestry, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China; ²Guangxi Academy of Forestry Research, Guangxi Forestry Pest Natural Enemy Breeding Engineering Technology Research Center, Nanning, Guangxi 530002, China

Abstract:【Aim】This study aims to investigate the volatile materials from different parts of healthy *Pinus massoniana*, analyze the differences in the types and contents of volatiles in different parts of the plants, and evaluate the antennal potential and olfactory responses of adult *Monochamus alternatus* to these volatiles.【Method】The static headspace method and gas chromatography-mass spectrometry were used to analyze the volatile compositions of six parts of pine: needles, 1 cm branches, 5 cm branches, 20 cm trunks, 30 cm trunks, and pine oil, and measure the antennal potential and behavioral responses of male and female adult *M. alternatus* to the volatiles.【Result】In the volatile extracts from the six parts, 36 different volatile compounds were detected. These parts displayed similar types of volatiles, but there were significant differences in the relative contents among them. Terpenes, including laurin, pinene, L-beta-pinene, camphene, etc., were the predominant volatile compounds. Electroantennogram experiment showed that the 5 cm branches volatile extract had the highest value for female adults of *M. alternatus*, and the pine oil volatile extract had the highest value for male adults. The behavioral response experiment showed that the volatiles of each part had a certain attractive effect on the adults of *M. alternatus*. Among them, the female adults exhibited the strongest attraction to the volatile extracts of 5 cm branches, and the male adults exhibited the strongest attraction to the volatile extracts of 30 cm trunks and pine oil.【Conclusion】Under healthy conditions, the plant-derived attractants made of terpene volatiles in 5 cm branches, 30 cm trunks, and pine oil of *P.*

收稿日期(Received): 2023-06-01 接受日期(Accepted): 2024-03-27

基金项目: 广西重点研发计划项目(桂科 AB21220004)

作者简介: 王维招, 女, 硕士研究生。研究方向: 昆虫生理生态学。E-mail: 3354822006@qq.com

* 通信作者(Author for correspondence), 杨振德, E-mail: 511690115@qq.com

massoniana demonstrated better attraction to the *M. alternatus* adults. This study will provide a reference for improving the effect of existing attractants and provide a scientific basis for the prevention and control of *M. alternatus* pest.

Key words: *Pinus massoniana*; *Monochamus alternatus*; volatiles; contact angle potential; behavior choice

马尾松 *Pinus massoniana* Lamb 有着适应性强、经济价值高等特点,是我国重要的森林资源之一。近年来,由于松材线虫病的暴发,马尾松大面积死亡,严重威胁马尾松资源的开发与利用。而松墨天牛 *Monochamus alternatus* Hope 是导致松材线虫病在马尾松林中传播的主要媒介(宁静等,2018;王保新等,2019)。因此,对松墨天牛进行有效控制,可以降低松材线虫的传播和危害。目前,防治松墨天牛的方法有化学防治、物理防治、营林防治、生物防治、引诱剂与趋避剂防治等(马艳,2019;张凌云,2019)。然而,各种防治方法都存在一定的局限性,例如,化学防治中,喷洒农药不仅对环境造成污染,而且对森林的健康、自然保护区的建设和生态系统的循环产生影响;物理防治中,伐除枯死木或濒死木,悬挂诱虫灯诱杀等消耗大量的人力、物力、财力等。而用引诱剂来防治松墨天牛不会造成环境污染和生态环境破坏,同时不会伤害松墨天牛的自然天敌,操作简单便捷,是一种具有很好研究前景的方法。

植物挥发物是一种在植物生长期间释放的有机化合物,它是昆虫和寄主植物结合的基础(Reddy & Guerrero,2004)。自然界绝大多数植食性昆虫的定向、取食、繁殖和产卵都是靠寄主植物的挥发物来完成的(梁薇等,2022;向玉勇等,2015;Martorana,2016),这是植物与昆虫之间长期相互影响、相互作用、协同进化的结果(王延来等,2020)。因此,分析植物挥发物的活性成分和相对含量可深入了解植物与昆虫之间的联系,为寄主植物挥发物防治病虫害奠定基础(蒋方一丁等,2020;Heil,2014)。关于松科植物挥发物,前人已做出了大量的研究,赖略等(2022)研究表明,马尾松松针中主要挥发物是 α -蒎烯、 β -蒎烯和D-吉玛烯等;李水清和张钟宁(2007)研究表明,马尾松枝条挥发物主要成分是 β -水芹烯、 α -蒎烯、 β -蒎烯、萜品油烯等;宁眺等(2006)发现,马尾松树干和枝条中主要挥发物为 α -蒎烯、 β -蒎烯和 β -水芹烯等。植物源引诱剂主要利用植物挥发物对昆虫行为的影响达到对其进行防治的目的。近年来,大量研究表明,寄主植物中的一些挥发物对天牛具有引诱作用,如一定浓度的柠檬烯、3-萜烯和罗汉

柏烯对双条天牛 *Semanotus bifasciatus* (Motschulsky)(武晓颖,2009),聚集素齿小蠹烯醇和齿小蠹二烯醇等2种物质对多种天牛(樊建庭等,2013),植物挥发物中的壬醛和石竹烯2种物质对星天牛 *Anoplophora chinensis* (Forster)(朱宁等,2017),植物挥发物 α -蒎烯对于松墨天牛成虫(周琳等,2006)。另外,钱明惠等(2015)研究鉴定出壬醛是松墨天牛雄成虫的信息素;高娜等(2013)和孟俊国(2013)研究发现,植物源气味中 α -蒎烯对松墨天牛成虫的引诱活性较强。我国学者利用松树挥发性物质,研制开发出了多种类型的松墨天牛引诱剂,如Mat-1号诱捕剂,FJ-Ma-02引诱剂,M99-1引诱剂,NL-01型、F2型、APF-1型引诱剂,再与相应配套顶盖、十字挡板、漏斗、集虫桶组成的诱捕器联合使用,在诱杀松墨天牛成虫、控制天牛种群上,取得了良好的效果(赵锦年等,2011;周爱东等,2023),为研究植物源引诱剂对松墨天牛的防治做出了贡献。

通过触角电生理和行为学等手段,可以检测寄主植物释放的化学物质对昆虫行为的影响,并从中筛选出具有引诱作用的挥发性物质(田厚军等,2012;Marion-Poll et al.,2011;Rojas,1999)。目前的研究主要集中在马尾松单一部位挥发物对松墨天牛行为的影响,而关于不同生理状态下马尾松不同部位挥发物对松墨天牛的行为影响未见报道。本研究采用静态顶空法分析健康马尾松松针、1 cm 枝条、5 cm 枝条、20 cm 树干、30 cm 树干、松油脂6个部位的挥发性物质组分,比较其不同部位挥发物的种类差异及含量,利用电生理试验和生物行为试验检测寄主植物的挥发物是否对昆虫的行为选择有影响。研究结果可以筛选出对松墨天牛具有引诱作用的挥发物,为提高现有诱捕剂的效果提供参考,也为昆虫的绿色无公害防治奠定基础。

1 材料与方法

1.1 采样地概况

采样地位于广西壮族自治区梧州市苍梧县梨埠镇(23°46'50"N,111°30'06"E),属丘陵地,地势西北高、东南低,地处亚热带季风气候区,温和湿润,日照充足,雨量充沛。年平均温度 21.7℃,年降水

量 1573.6 mm, 年平均生长期 222 d。土壤为水田、旱园地、山丘地三大土类。

1.2 试验材料

2022 年 6 月, 于试验地采集长势良好、未受松墨天牛危害的健康的马尾松松针、1 cm 枝条、5 cm 枝条、20 cm 树干、30 cm 树干及松油脂, 分别放入样品袋中带回实验室。同时, 采集松墨天牛虫害木段, 带回实验室直至成虫羽化。用养虫盒收集松墨天牛成虫, 在室内用新鲜的松枝在养虫盒(上口直径 11.5 cm, 下口直径 10.0 cm, 高 8.0 cm)内单头饲养, 2~3 d 更换一次松枝, 试验前一天停止喂养。

1.3 挥发物的收集

采用有机溶剂浸泡法提取植物的挥发性物质。称取 10 g 马尾松样品, 剪为 0.5 cm×0.5 cm 的碎状, 放入 50 mL 样品瓶, 加入高效液相正己烷溶液(天津市富宇精细化工有限公司)20 mL, 浸提 15 h。浸提液用有机过滤头过滤, 并用氮吹仪浓缩至 1.0 mL, 置于棕色样品瓶中, 放置于 -20 ℃ 冰箱中保存备用。

将马尾松样品自然晾干一段时间后捣碎, 称取 2 g 放入 20 mL 顶空瓶, 于 60 ℃ 下加热震荡平衡 30 min, 每隔 3 min 震荡 1 次, 每次震荡时间为 5 s, 振荡器转速为 250 r·min⁻¹, 30 min 后抽取顶空气体 1 mL 进行气相色谱-质谱(GC-MS)分析, 每个样品进行 3 次重复(郭勇等, 2009)。

1.4 挥发物的鉴定

运用 GC-MS 联用仪(GCMS-TQ8050 NX)对马尾松不同部位的挥发物进行定性定量分析。气相色谱条件: 色谱柱为 HP-5ms Ultra Inert (30 m×250 μm×0.25 μm, 美国安捷伦), 载气为氦气, 色谱柱流量为 2 mL·min⁻¹。升温程序: 起始温度 50 ℃, 保持 2 min, 以 5 ℃·min⁻¹ 升温至 250 ℃, 以 10 ℃·min⁻¹ 升温至 300 ℃, 保持 10 min。进样口温度 250 ℃, 分流进样, 分流比是 10:1, 定量方法为面积归一法。质谱条件: 电离方式 EI, 电离能量为 70 eV, 离子源温度为 230 ℃, 接口温度为 280 ℃, 进样方式 GC, 质谱离子扫描范围为 30~650 m/z, 扫描方式为全扫描。经 GC-MS 分析得到的所有化合物的质谱图均采用 NIST11 标准谱库进行匹配分析, 根据匹配度确定预测的化合物, 得到相对应的物质, 采用峰面积归一化法进行定量分析, 从而可以获得各成分的相对含量(张静静等, 2019)。

1.5 触角电位测定

参照郝德君等(2008)的方法, 选取 10~20 日龄的松墨天牛成虫, 将触角从基部的第四节剪下, 切除末端 1 mm, 将两端固定在电极上, 用微量进样器吸取 10 μL 样品均匀滴在 5 cm×0.5 cm 的滤纸条上, 放入 10 cm 长的样品管中, 样品管末端连接气体刺激控制装置, 送气管管口与触角纵向垂直, 并与触角相距 1 cm 左右, 待基线稳定后给予刺激, 刺激气流流量与持续气流流量均为 5 mL·s⁻¹, 每次刺激时间为 1 s, 2 次刺激之间间隔 1 min。同一化合物同一剂量在一根触上重复刺激 3 次, 至少重复 6 根触角, 用正己烷作为对照。利用 Syntech 公司提供的 EAGPro 2.0 软件进行数据记录与分析。

1.6 室内行为反应测定

参照王焱(2008)和郝德君等(2006)的研究方法, 用四臂嗅觉进行测定, 用 LZB-4 型玻璃转子式流量计将每臂的空气流量控制在 600 mL·min⁻¹。用微量取样器吸取 5 μL 待测物质, 滴在 5 cm×0.5 cm 的滤纸条上, 放入四臂嗅觉仪对角线两臂的味源瓶中, 将滴加正己烷的同样规格滤纸条, 放入另一对角线的两味源瓶中作为对照, 采用人工光源照明。选取健康完好且活力较强的松墨天牛成虫进行嗅觉行为测定, 测定前将试虫饥饿 2 h 后接入四臂嗅觉仪中央, 观察 10 min 后记录, 对进入引诱臂和对照臂 5 cm 以上且停留超过 5 min 的分别记作对气味源具有正趋向性和负趋向性, 否则记为无反应。同一挥发物提取物对松墨天牛的嗅觉行为测定, 记为一组, 每测完一组后用酒精清洗样品瓶, 并用电吹风吹干, 同时调换嗅觉仪两臂的方向, 以消除试验环境对松墨天牛嗅觉行为产生的影响, 每个部位挥发物提取物每次测定 5 头松墨天牛, 重复 4 次, 计算其引诱率、趋避率、反应率、选择反应率和选择系数。

引诱率/% = 味源管中虫数量/测试虫总数×100

趋避率/% = 对照管中虫数量/测试虫总数×100

反应率/% = (味源管中虫数量+对照管中虫数量)/测试虫总数×100

选择反应率/% = 味源管中虫数量/(味源管中虫数量+对照管中虫数量)×100

选择系数 = (味源管中虫数量-对照管中虫数量)/(味源管中虫数量+对照管中虫数量)

1.7 数据处理

利用 Excel 2019 对数据进行整理, 使用 SPSS

Statistics 20.0 对数据进行分析,挥发物相对含量差异性、触角电位反应和行为反应显著差异性均采用 ANOVA 检验法和 Duncan 检验法进行分析比较。

2 结果与分析

2.1 马尾松不同部位挥发物组分及相对含量分析

经 GC-MS 分析,健康状态下马尾松 6 个部位共鉴定出 34 种化合物(表 1)。松针、1 cm 枝条、5 cm 枝条、20 cm 树干、30 cm 树干、松油脂中别鉴定出 22、16、15、11、15、21 种挥发性成分,其中,2-蒎烯在松

针、1 cm枝条、5 cm 枝条、30 cm 树干中相对含量最高,分别为 33.35%、38.89%、49.65%、45.97%。20 cm 树干中蒎烯的相对含量最高,为 42.53%。松油脂中罗勒烯的相对含量最高,为 49.58%。蒎烯、月桂烯、蒎烯、左旋-beta-蒎烯为 6 个部位共有,但相对含量存在差异,分别在 20 cm 树干、松针、20 cm树干、1 cm 枝条中相对含量最高,分别为42.53%、7.18%、1.97%、26.62%。该结果说明马尾松各部位中萜烯类挥发物种类丰富且相对含量较高。

表 1 马尾松健康状态下不同部位挥发物组分及相对含量

Table 1 Components and relative contents of volatiles in different parts of <i>P. massoniana</i> under healthy condition								
序号 Serial number	CAS 号 CAS number	化合物名称 Chemical compounds	相对含量 Relative content/%					
			松针 Pine needle	1 cm 枝条 1 cm ranches	5 cm 枝条 5 cm ranches	20 cm 树干 20 cm runks	30 cm 树干 30 cm runks	松油脂 Pine oil
1	110-12-3	5-甲基-2-己酮 5-Methyl-2-hexanone	—	1.11±0.01	—	—	—	—
2	76-22-2	2-茨酮 Camphor	—	—	—	—	0.09±0.01	—
3	66-25-1	己醛 Hexanal	0.28±0.01d	0.50±0.02c	3.06±0.08a	—	2.13±0.06b	—
4	110-62-3	戊醛 Pentanal	—	0.15±0.01c	0.46±0.02a	—	0.33±0.01b	—
5	505-57-7	2-己烯醛 2-Hexenal	0.20±0.01	—	—	—	—	—
6	7785-70-8	蒎烯 Pinene	0.23±0.02d	0.21±0.02d	0.42±0.01b	1.97±0.02a	0.30±0.02c	0.02±0.01e
7	80-56-8	2-蒎烯 2-Pinene	33.35±1.02d	38.89±2.03c	49.65±0.98a	—	45.97±2.06b	1.43±0.07e
8	79-92-5	茨烯 Camphene	2.47±0.03cd	1.57±0.01e	2.69±0.04c	42.53±0.41a	2.29±0.03d	6.66±0.06b
9	13466-78-9	3-蒎烯 3-Carene	0.52±0.02a	—	—	1.44±0.03a	—	0.10±0.01
10	18172-67-3	左旋-beta-蒎烯 L-beta-pinene	24.67±0.51a	26.62±3.04a	6.56±1.10c	7.06±1.05c	3.00±0.07d	18.07±2.04b
11	123-35-3	月桂烯 Myrcene	7.18±1.02a	0.91±0.03cd	0.48±0.01cd	1.10±0.02c	0.19±0.01d	3.49±0.20b
12	127-91-3	β-蒎烯 Nopinene	—	—	—	—	—	0.02±0.01
13	99-83-2	2-甲基-5-(1-甲基乙基)-1,3-环己二烯 2-Methyl-5-(1-methylethyl)-1,3-cyclohexadiene	0.15±0.01a	0.03±0.01b	—	—	—	0.14±0.01a
14	555-10-2	3-亚甲基-6-(1-甲基乙基)环己烯 3-Methylene-6-(1-methylethyl)cyclohexene	—	6.80±0.70a	2.02±0.30b	—	—	0.60±0.10c
15	586-62-9	萜品油烯 Terpinolene	0.07±0.01c	0.24±0.02b	0.20±0.01b	1.46±0.10a	0.07±0.01c	0.06±0.01c
16	5989-27-5	右旋蒎二烯 D-limonene	14.03±1.30a	—	—	1.27±0.80b	0.92±0.20b	—
17	13877-91-3	罗勒烯 Ocimene	0.07±0.01b	—	—	0.26±0.02b	—	49.58±2.32a
18	99-85-4	萜品烯 Terpinene	0.09±0.01b	—	—	4.42±0.20a	—	0.08±0.01b
19	4497-92-1	2-蒎烯 2-Carene	2.47±0.40a	—	—	—	—	0.70±0.10b
20	544-25-2	环庚三烯 Cycloheptatriene	—	—	—	—	0.19±0.01	—
21	475-20-7	长叶烯 Longifolene	0.40±0.01b	0.30±0.03b	1.01±0.10a	—	1.27±0.60a	0.13±0.01b
22	87-44-5	1-石竹烯 1-Caryophyllene	2.06±0.30a	1.67±0.02b	0.24±0.02d	—	0.11±0.01d	0.57±0.04c
23	6753-98-6	α-石竹烯 α-Caryophyllene	0.18±0.01a	0.16±0.01a	—	—	—	0.05±0.01b
24	3856-25-5	α-蒎烯 α-Pinene	0.04±0.01b	—	0.28±0.03a	—	—	—
25	5989/8/2	(+)-α-长叶蒎烯 (+)-α-longifolene	—	0.26±0.01c	1.01±0.50ab	—	1.27±0.40a	0.36±0.01bc
26	4630/7/3	巴伦西亚橘烯 Valencene	—	4.02±0.30c	13.38±1.70b	—	16.42±1.04a	0.13±0.01d
27	116-04-1	β-律草烯 β-Humulene	—	—	—	—	—	3.77±0.70
28	115-95-7	乙酸芳樟酯 Linalyl acetate	0.53±0.20	—	—	—	—	—
29	76-49-3	乙酸冰片酯 B. acetate	0.06±0.01	—	—	—	—	—
30	107-83-5	2-甲基戊烷 2-Methylpentane	—	—	—	0.15±0.01	—	—
31	109-66-0	正戊烷 Pentane	—	—	—	—	—	0.10±0.01
32	546-79-2	2-甲基-5-异丙基-二环[3.1.0]己烷-2-醇 2-Methyl-5-isopropyl-bicyclo[3.1.0]hexane-2-ol	—	—	—	21.49±1.02a	—	7.33±2.01b
33	111-27-3	正己醇 N-hexanol	0.07±0.01	—	—	—	—	—
34	99-87-6	4-异丙基甲苯 4-Isopropyltoluene	0.06±0.01	—	—	—	—	—

“—”表示化合物成分在该部位未检测出,同行不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。
“—” indicates that the compound component was not detected in this part, different lowercase letters of peers indicate significant differences ($P<0.05$).

2.2 马尾松不同部位挥发物种类

由表 2 可以看出,马尾松 6 个部位挥发物的主要化合物类别有萜烯类、醛类、醇类、醚类、酯类、烷

类和苯类,其中萜烯类化合物的相对含量和多样性最丰富;醛类化合物的种类虽然较多,但是含量不高;而醇类、酯类、酮类、烷类和苯类化合物的种类和

数量都很少。松针、1 cm 枝条、5 cm 枝条、20 cm 树干、30 cm 树干、松油脂中萜烯类化合物分别有 16、13、12、9、12、19 种,分别占总挥发物含量的 87.98%、81.68%、77.94%、61.51%、72.00%、85.96%。

表 2 马尾松健康状态下各部位挥发物种类及含量
Table 2 Types and contents of volatiles in different parts of *P. massoniana* under healthy condition

化合物种类 Types of compounds	松针 Pine needle		1 cm 枝条 1 cm ranches		5 cm 枝条 5 cm ranches		20 cm 树干 20 cm runks		30 cm 树干 30 cm runks		松油脂 Pine oil	
	种类 Type	相对含量 Relative content/%	种类 Type	相对含量 Relative content/%	种类 Type	相对含量 Relative content/%	种类 Type	相对含量 Relative content/%	种类 Type	相对含量 Relative content/%	种类 Type	相对含量 Relative content/%
酮类 Ketones	—	—	—	—	—	—	—	—	1	0.09±0.01	—	—
醛类 Aldehydes	2	0.48±0.11	2	0.65±0.03	2	3.52±0.10	—	—	2	2.46±0.06	—	—
萜烯类 Terpenes	16	87.98±4.65	13	81.68±6.23	12	77.94±4.80	9	61.51±2.65	12	72.00±4.46	19	85.96±5.72
酯类 Esters	2	0.59±0.21	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
烷类 Alkanes	—	—	—	—	—	—	1	0.15±0.01	—	—	1	0.10±0.01
醇类 Alcohols	1	0.07±0.01	—	—	—	—	1	21.49±1.02	—	—	1	7.33±2.01
苯类 Benzene	1	0.06±0.01	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

2.3 马尾松不同部位挥发物对松墨天牛触角电位的影响

由图 1 所示,提取的 6 种混合气味源均能引起松墨天牛雌雄成虫比较明显的触角电位反应。在 5 cm 枝条提取物作用下,雌性天牛成虫的触角电位反应值最高,且显著高于其他部位 ($P<0.05$)。在 1 cm 枝条提取物作用下,触角电位反应值最低。雄性天牛成虫在松油脂提取物作用下,触角电位反应值最高且显著高于其他部位 ($P<0.05$)。在松针、5 cm 枝条、20 cm 树干提取物作用下,雌性天牛成虫的触角电位反应值显著大于雄性天牛成虫 ($P<0.05$)。在 1 cm 枝条、30 cm 树干松油脂提取物作用下,雄性天牛成虫的触角电位反应值均大于雌性天牛成虫,且在松油脂提取物作用下,雌性和雄性天牛成虫的触角电位反应值差异显著 ($P<0.05$)。结果表明,马尾松 6 个部位挥发物中,在 5 cm 枝条、松油脂挥发物提取物作用下,雌性和雄性天牛成虫分别有最高的敏感性,且雌雄性天牛成虫对马尾松不同部位挥发物提取物的敏感性不同。

2.4 马尾松不同部位挥发物对松墨天牛行为反应的影响

由图 2 可知,在马尾松不同部位挥发物提取物作用下,松墨天牛雌雄成虫的引诱率均高于对照在 5 cm 枝条提取物作用下,雌性成虫的引诱率最高在 30 cm 树干提取物作用下,雄成虫的引诱率最高。在松针、1 cm 枝条、松油脂提取物作用下,雌虫的引诱率均显著高于对照组 ($P<0.05$),且 5 cm 枝条、20 cm 树干提取物作用下,雌虫引诱率极显著高于对照组 ($P<0.01$)。在 1 cm 枝条、5 cm 枝条、20 cm 树

干提取物作用下,雄虫引诱率均显著高于对照组 ($P<0.05$),且 30 cm 树干松油脂提取物作用下雄虫引诱率极显著高于对照组 ($P<0.01$)。行为反应值表明,马尾松 6 个部位挥发物提取物中,在 5 cm 枝条、30 cm 树干挥发物提取物作用下,雌性和雄性天牛成虫分别有最高的选择性,且雌雄性天牛成虫对马尾松不同部位挥发物提取物的选择性不同。

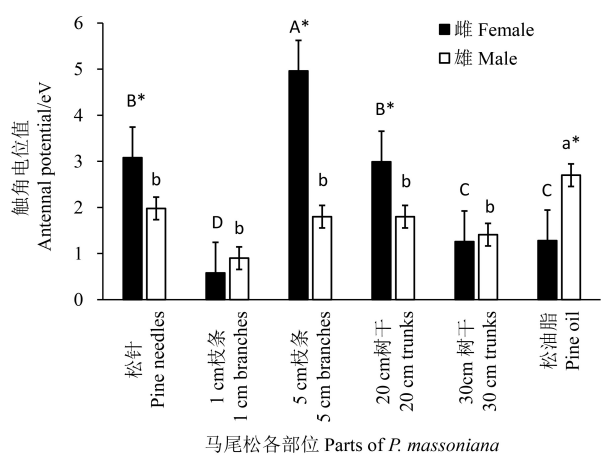


图 1 马尾松不同部位挥发物作用下松墨天牛的触角电位值
Fig.1 The electroantennogram value of *M. alternatus* under the action of volatiles from different parts of *P. massoniana*
不同大写字母表示马尾松不同部位挥发物作用下雌虫的触角电位值差异显著 ($P<0.05$);不同小写字母表示马尾松不同部位挥发物作用下雄虫的触角电位值差异显著 ($P<0.05$), * 表示同一部位挥发物作用下雌雄虫触角电位值差异显著 ($P<0.05$)。
Different capital letters indicated that the antennal potential values of females under the action of volatiles from different parts of *P. massoniana* were significantly different ($P<0.05$). Different lowercase letters indicated that there was a significant difference in the antennal potential value of males under the action of volatiles from different parts of *P. massoniana* ($P<0.05$), and * indicated that there was a significant difference in the antennal potential value of males and females under the action of volatiles from the same part ($P<0.05$).

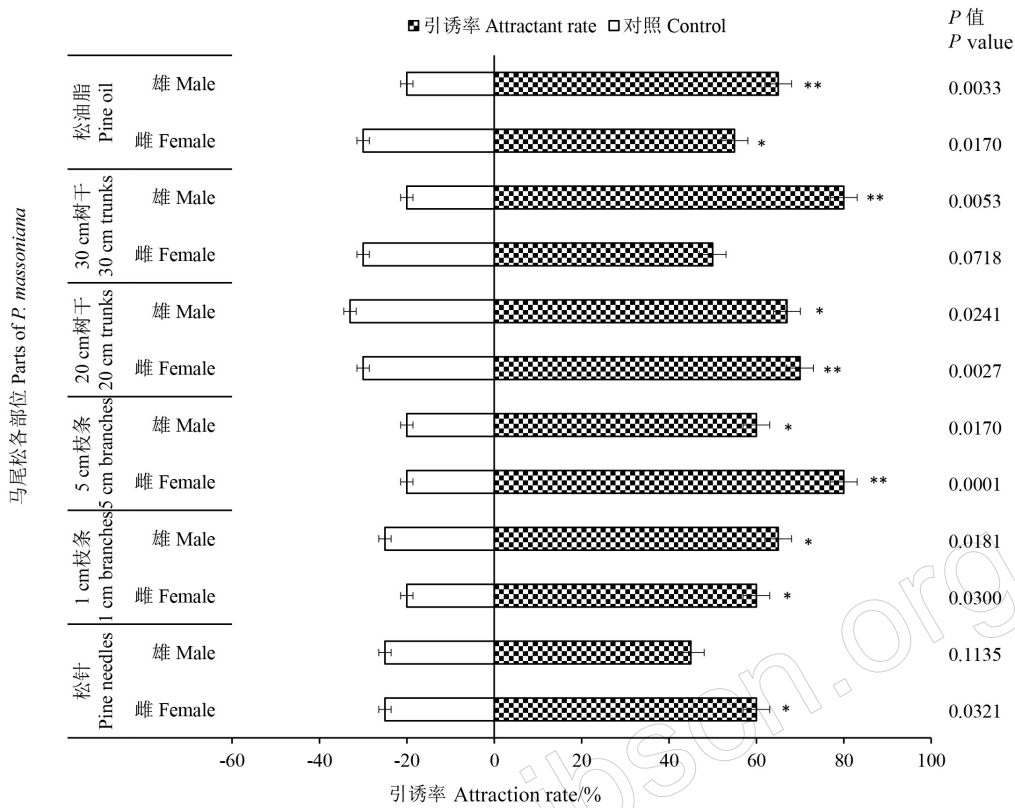


图 2 马尾松不同部位挥发物作用下松墨天牛成虫的行为反应值

Fig.2 Behavioral response value of *M. alternatus* adults under the action of volatiles from different parts of *P. massoniana*

* 表示同一部位引诱率与对照差异显著 ($P<0.05$), ** 表示引诱率与对照差异极显著 ($P<0.01$)。

* indicated that the attraction rate of the same part was significantly different from that of the control ($P<0.05$),

** indicated that the attraction rate was significantly different from the control ($P<0.01$).

在马尾松 6 个部位挥发物提取物作用下松墨天牛成虫具有较强的嗅觉行为反应(表 3)。从反应率和选择反应率来看,均超过 60%。其中,5 cm 枝条挥发物提取物对雌性成虫的作用做大,30 cm 树干挥发物提取物对雄成虫的作用最大。整体上看,6 个部位挥发物提取物中,松针、5 cm 枝条、20 cm 树干挥发物提取物对雌性成虫的作用高于雄

虫,而 1 cm 枝条、30 cm 树干、松油脂的挥发物提取物对雄成虫的作用更高。从选择系数来看,马尾松 6 个部位挥发物对雌雄成虫的影响均呈正趋性。结果表明,马尾松 6 个部位挥发物提取物对松墨天牛总体表现出较高的引诱率,而不同部位之间各反应值存在一定的差异,这可能与马尾松各部位挥发性物质种类或挥发性物质相对含量差异有关。

表 3 马尾松不同部位挥发物作用下松墨天牛成虫的行为选择反应率

Table 3 Behavioral selection responderate of *M. alternatus* adults under the action of volatiles from different parts of *P. massoniana*

挥发物 Volatiles	性别 Sex	反应率 Responderate/%	选择反应率 Slection responseat/%	选择系数 Slection coefficient
松针 Pine needles	雌 Female	80±20	74±7	0.47±0.13
	雄 Male	70±26	63±11	0.19±0.14
1 cm 枝条 1 cm ranches	雌 Female	100±0	74±2	0.50±0.20
	雄 Male	100±0	75±19	0.50±0.38
5 cm 枝条 5 cm ranches	雌 Female	100±0	85±1	0.70±0.20
	雄 Male	85±19	65±7	0.31±0.14
20 cm 树干 20 cm runks	雌 Female	100±0	70±12	0.40±0.23
	雄 Male	100±0	67±12	0.33±0.50
30 cm 树干 30 cm runks	雌 Female	100±0	80±0	0.60±0.00
	雄 Male	100±0	94±9	0.88±0.19
松油脂 Pine oil	雌 Female	85±19	65±7	0.31±0.14
	雄 Male	85±19	75±6	0.51±0.13

3 讨论与结论

本研究以马尾松为研究对象,采集其健康状态下6个部位的挥发性物质,利用静态顶空-气相色谱-质谱联用技术对其进行定性定量分析。结果显示,马尾松各个部位挥发物的种类和相对含量都存在着明显的差异,与宁眺等(2006)、吴楚材和郑群明(2005)、谢云忠等(2021)关于松科植物组织挥发物的研究结果类似。本研究马尾松以松针和松油脂中的挥发物种类最多,其次为1 cm 枝条、5 cm 枝条、30 cm 树干,20 cm 树干中挥发物种类最少。马尾松松针挥发物中检测出22种化合物,主要化合物成分有2-蒎烯(33.35%),左旋-beta-蒎烯(24.67%)、右旋蒎二烯(14.03%)、月桂烯等(7.18%),与谢俊康等(2021)的研究结果一致。马尾松6个部位的挥发物种类及含量虽有差异,但其主要挥发物类别均是萜烯类物质,共有化合物4种,分别是蒎烯、月桂烯、蒎烯、左旋-beta-蒎烯,且除了20 cm 树干以外,其他部位都含有较高含量的2-蒎烯,与刘敏等(2021)、任琴等(2005)关于松科植物挥发物种类和成分研究较一致。另外,宁眺等(2006)对不同生理状态下马尾松挥发物进行分析,结果表明,不同生理状态下萜烯化合物的相对含量会发生显著变化。因此,对健康状态下马尾松不同部位挥发物进行研究也可为判断马尾松树势衰弱程度变化提供参考。

在健康状态下,马尾松6个部位的挥发物提取物对均松墨天牛有一定的刺激作用,并对松墨天牛的行为选择有一定的影响。在健康状态下5 cm 枝条和松油脂挥发物提取物分别引起的松墨天牛两性成虫的触角电位值最高。行为反应验中,5 cm 枝条挥发物提取物的率最高,30 cm 树干挥发物提取物的率最高,说明马尾松中挥发物成分对松墨天牛的偏好选择行为具有调控作用,不同部位引起的触角电位和行为反应值并不相同,其原因可能是由于马尾松各个部分的挥发物成分类型、相对含量存在差异、或含有某种或某些特殊的挥发性成分,或是以上等多种因素的综合作用有关(Hare, 2011; Kuroda, 1989)。

电生理行为反应测定的是昆虫触角对单独一个物质或者一个混合物质的整体反应,GC-MS测定的是混合物中具体物质是什么,而昆虫触角对混合物中哪种物质有反应需要进一步的气相色谱-触角

电位联用(GC-EAD)测定,GC-EAD中GC可以看出植物气味中有多少种成分,EAD可以看出触角对相应物质的电位反应,随后结合GC-MS中化合物谱找到有明显反应的物质成分,再进行研究验证(王紫薇等,2016; Knolhoff & Heckel, 2014)。本研究发现,马尾松6个部位中萜烯类化合物种类及含量均很丰富,结合GC-MS中马尾松各部位挥发物成分和相对含量及各部位挥发物提取物作用下松墨天牛成虫的触角电位和行为反应研究结果,猜测马尾松5 cm 枝条中2-蒎烯、蒎烯、左旋-beta-蒎烯巴伦西亚橘烯这些挥发物可能对松墨天牛雌性成虫具有较强的引诱作用;30 cm 树干、松油脂个部位中2-蒎烯、蒎烯、左旋-beta-蒎烯、巴伦西亚橘烯、罗勒烯这些挥发物可能对松墨天牛雄成虫具有较强的引诱作用。而这几种化合物对松墨天牛雌雄成虫是否都有刺激作用,刺激程度如何,或是它们的组合反应如何,这些仍需进一步的气相色谱-触角电位联用、生物测定及野外试验进行鉴定与验证。

参考文献

- 樊建庭, 孟俊国, WANG B, 赵莉茜, 孙江华, 2013. 聚集性信息素和植物源信息素对松墨天牛的联合诱捕作用. 应用昆虫学报, 50(5): 1274-1279.
- 高娜, 姚洪锡, 李超, 于丽颖, 卢希平, 2013. 松褐天牛产卵刻痕在黑松树干上分布规律的研究. 环境昆虫学报, 35(1): 33-38.
- 郭勇, 宋芸娟, 缪剑华, 2009. 静态顶空-气相色谱-质谱法测定八角挥发性成分. 药物分析杂志, 29(1): 91-95.
- 郝德君, 马凤林, 王焱, 张永慧, 戴华国, 2006. 松墨天牛对不同生理状态黑松挥发物的触角电生理和行为反应. 应用生态学报, 17(6): 1070-1074.
- 郝德君, 杨建霞, 唐进根, 戴华国, 2008. 松墨天牛对雪松挥发物的触角电位和嗅觉反应. 福建林学院学报, 28(3): 233-236.
- 蒋方一丁, 吕宝乾, 唐继洪, 卢辉, 何杏, 苏豪, 2020. 椰心叶甲危害对椰树心叶挥发物的影响. 生物安全学报, 29(4): 264-267.
- 赖略, 邹学冰, 徐金柱, 秦长生, 杨华, 田龙艳, 张春花, 邱华龙, 2022. 马尾松叶片挥发物组成及其对松墨天牛有触角电生理反应的活性成分鉴定. 林业与环境科学, 38(3): 148-153.
- 李水清, 张钟宁, 2007. 马尾松枝条挥发性组分的鉴定及松墨天牛对其触角电生理反应. 昆虫知识, 44(3): 385-389.
- 梁薇, 麻亚辉, 陈丽慧, 魏洪义, 2022. 寄主植物对植食性

- 昆虫选择行为影响的研究进展. 生物灾害科学, 45(3): 299-304.
- 刘敏, 刘宇杰, 付宁宁, 徐强, 刘玉山, 任利利, 骆有庆, 2021. 7 种松树挥发物分析及其主要萜烯类物质对红脂大小蠹行为选择的影响. 环境昆虫学报, 43(1): 48-59.
- 马艳, 2019. 山核桃天牛植物源引诱剂的初步研究. 硕士学位论文. 杭州: 浙江农林大学.
- 孟俊国, 2013. 松墨天牛性引诱剂配套技术及松材线虫化学信号物质初探. 硕士学位论文. 杭州: 浙江农林大学.
- 宁静, 张宾, 田浩楷, 柳小龙, 杨炳琰, 赵莉茜, 2018. 携带与非携带松材线虫的松墨天牛 miRNA 表达谱比较分析. 生物安全学报, 27(1): 20-30.
- 宁眺, 樊建庭, 方宇凌, 孙江华, 2006. 不同危害状态下寄主萜烯挥发物含量的变化及松墨天牛对其组分的触角电位反应. 昆虫学报, 49(2): 179-188.
- 钱明惠, 黄泽翰, 方海鹏, 黄勇槐, 魏纳生, 黄焕华, 2015. 松褐天牛性信息素的触角电位和气质联机鉴定. 广东林业科技, 31(4): 1-5.
- 任琴, 李镇宇, 胡永建, 金幼菊, 陈华君, 2005. 受害马尾松、湿地松挥发性化学物质的释放. 生态学报, 25(11): 136-140.
- 田厚军, 陈艺欣, 魏辉, 邱良妙, 刘其全, 石妍, 占志雄, 2012. 芒果不同部位挥发物及横线尾夜蛾对其触角电位反应. 生物安全学报, 21(2): 142-147.
- 王保新, 许秀兰, 肖前刚, 黄倩颖, 2019. 松墨天牛对马尾松健康植株挥发物的 EAG 反应. 农家参谋 (19): 103-104.
- 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.
- 王焱, 2008. 松墨天牛引诱剂和松材线虫分子检测技术研究. 博士学位论文. 南京: 南京林业大学.
- 王紫薇, 徐华潮, 张妮妮, 王佩星, 2016. 光肩星天牛对寄主的选择及主要寄主挥发物的化学成分分析. 浙江农林大学学报, 33(4): 558-563.
- 吴楚材, 郑群明, 2005. 植物精气研究. 中国城市林业, 3(4): 61-63.
- 武晓颖, 2009. 双条杉天牛植物源引诱剂及衰弱寄主植物诱虫机理的研究. 博士学位论文. 北京: 北京林业大学.
- 向玉勇, 刘同先, 张世泽, 2015. 植物挥发物在植食性昆虫寄主选择行为中的作用及应用. 安徽农业科学, 43(28): 92-94.
- 谢俊康, 陈虎, 谭健晖, 罗群凤, 汪挺, 杨章旗, 2021. 外源信号物质对马尾松幼苗松针挥发物的影响. 中南林业科技大学学报, 41(10): 29-36.
- 谢云忠, 王国伟, 刘江桥, 徐芳玲, 2021. 微红梢斑螟诱导马尾松挥发物成分变化及其行为反应. 中国森林病虫, 40(6): 8-14.
- 张静静, 白泽珍, 李亚勇, 杨美红, 赵祥, 2019. 紫花苜蓿不同部位的挥发性成分分析. 草原与草坪, 39(6): 11-18.
- 张凌云, 2019. 松墨天牛驱避信息化合物的筛选. 硕士学位论文. 合肥: 安徽农业大学.
- 赵锦年, 蒋平, 张星耀, 林云华, 黄照岗, 何玉友, 2011. 松褐天牛缓释型引诱剂及其引诱效果研究. 林业科学研究, 24(3): 350-356.
- 周爱东, 王伟才, 王岚, 尤幸, 陈婷婷, 雄贤荣, 2023. 3 种松墨天牛引诱剂诱捕效果比较. 林业科技通讯 (3): 81-84.
- 周琳, 马志卿, 冯岗, 张兴, 2006. 天牛性信息素、引诱植物和植物性引诱剂的研究与应用. 昆虫知识, 43(4): 433-438.
- 朱宁, 张冬勇, 吴利平, 胡琴, 樊建庭, 2017. 聚集信息素和寄主植物挥发物对光肩星天牛和星天牛的引诱作用. 昆虫学报, 60(4): 421-430.
- REDDY G V P, GUERRERO A, 2004. Interactions of insect pheromones and plant semiochemicals. *Trends in Plant Science*, 9(5): 253-261.
- HARE J D, 2011. Ecological role of volatiles produced by plants in response to damage by herbivorous insects. *Annual Review of Entomology*, 56(1): 161-180.
- HEIL M, 2014. Herbivore-induced plant volatiles: targets, perception and unanswered questions. *The New Phytologist*, 204(2): 297-306.
- KURODA K, 1989. Terpenoids causing tracheid-cavitation in *Pinus thunbergii* infected by the pine wood nematode (*Bursaphelenchus xylophilus*). *Japanese Journal of Phytopathology*, 55(2): 170-178.
- KNOLHOFF L M, HECKEL D G, 2014. Behavioral assays for studies of host plant choice and adaptation in herbivorous insects. *Annual Review of Entomology*, 59(1): 263-278.
- MARION-POLL F, THIERY D, 2011. Dynamics of EAG responses to host-plant volatiles delivered by a gas chromatograph. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 80(1): 120-123.
- MARTORANA L M C G, 2016. An invasive insect herbivore disrupts plant volatile-mediated tritrophic signalling. *Agro Food Industry Hi-Tech*, 90(4): 1079-1085.
- ROJAS J C, 1999. Electrophysiological and behavioral responses of the cabbage moth to plant volatiles. *Journal of Chemical Ecology*, 25(8): 1867-1883.

(责任编辑:陈晓雯)