

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2022.006.005

筛胸梳爪叩甲幼虫对竹笋挥发物及 CO₂ 的行为反应

张 威¹, 滕 莹², 黄徐骏³, 李志红¹, 张亚波¹, 舒金平^{1*}, 王浩杰¹

(1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 杭州 311400; 2. 浙江省杭州市富阳区农业农村局, 浙江 杭州 311400;
3. 浙江省遂昌县妙高林业工作中心站, 浙江 遂昌 323300)

摘要: [目的] 探析南方竹区重要地下害虫筛胸梳爪叩甲幼虫定位寄主的行为及化学机制, 为竹林金针虫的高效监测及防控提供科学依据。[方法] 利用双向选择仪测定筛胸梳爪叩甲幼虫对竹笋和 CO₂ 释放剂颗粒的行为反应。采用固相微萃取气质联用法 (SPME-GC-MS) 收集鉴定雷竹鲜笋的挥发性组分, 并测定其相对含量。[结果] 竹笋和 CO₂ 释放剂均能显著引发筛胸梳爪叩甲幼虫定向运动。筛胸梳爪叩甲幼虫对不同质量鲜笋的取食选择无显著差异 ($P>0.05$), 而不同浓度的 CO₂ 释放剂对筛胸梳爪叩甲幼虫的定向行为有显著影响 ($P<0.05$)。在竹笋和 CO₂ 释放剂之间, 筛胸梳爪叩甲幼虫显著偏好竹笋 ($P<0.05$)。收集鉴定雷竹笋挥发物 17 种, 相对含量较高为萜烯类化合物 (66.62%) 和倍半萜 (27.98%), 倍半萜中以 α -葑草烯含量最高。[结论] 筛胸梳爪叩甲幼虫对新鲜雷竹笋和 CO₂ 释放剂颗粒均有显著趋向性, 筛胸梳爪叩甲幼虫更偏好新鲜竹笋, 相比 CO₂ 释放剂, 竹笋萌发时所释放的挥发物对竹林金针虫搜寻寄主更为有效。本研究分离鉴定 7 种可能对筛胸梳爪叩甲幼虫具有吸引作用的萜烯类化合物, 为竹林金针虫新型防控技术研发提供了重要依据。

关键词: 金针虫; 地下害虫; CO₂; 挥发物; 引诱剂

中图分类号: S763.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2022)06-0044-08

“觅食”是生物生存与繁衍的基础, 是生物间食物链的关键一环, 也是生物学及进化生态学的核心内容^[1-2]。而植物挥发物 (VOCs) 在寄主植物-植食性昆虫-天敌三级营养链连接中发挥着至关重要的作用, 是植食性昆虫及天敌昆虫搜寻和定位寄主的重要信号物质^[3-6]。据统计, 在植食性昆虫与寄主互作研究中, 超 98% 的报道是以地面昆虫 (多以成虫为主) 为对象, 对于地下昆虫的关注较少^[7-8]。相对于地面昆虫而言, 在黑暗 (视觉刺激缺失)、复杂的土壤环境中昆虫如何定位到寄主植物知之不多^[9-11]。自 Doane 等^[12]首次证实马铃薯叩甲 (*Ctenicera destructor* (Brown)) 幼虫依靠植物根系释放的 CO₂ 定位寄主以来, 胡萝卜根实蝇

(*Psila rosae* F.)、玉米根萤叶甲 (*Diabrotica virgifera virgifera* Leconte) 及大栗鳃金龟 (*Melolontha hippocastani* Fabricius) 幼虫等多种地下昆虫被证实对 CO₂ 有显著的正趋向性^[9,13], CO₂ 一度被认为是地下植食性昆虫定位寄主的唯一信号物质^[14-15]。

随着研究的深入, 发现相比于 CO₂, 根部释放的挥发物对土壤植食性昆虫定位寄主更有效^[11,16-17], 如大麦 (*Hordeum vulgare* L.) 根系释放的 hexanal、(E)-hex-2-enal 及 (E)-non-2-enal 等 4 种挥发物能显著激发金针虫 (鞘翅目 (Coleoptera) 叩甲科 (Elateridae) 昆虫幼虫的统称) 的定向移动^[11]。植物根系挥发物在地下植食性昆虫寄主搜寻过程中

收稿日期: 2022-03-07 修回日期: 2022-04-19

基金项目: 浙江省基础公益研究计划项目 (LGN19C160003); 浙江省重点研发计划项目 (2019C02024)

* 通讯作者: 舒金平. E-mail: jpsu@caf.ac.cn

发挥着重要作用, 但研究报道并不多。筛胸梳爪叩甲 (*Melanotus cribricollis* (Faldernann)) 是我国南方竹林金针虫的优势种^[18], 主要蛀食雷竹 (*Phyllostachys violascens* (Carriere) Riviere & C. Riviere)、毛竹 (*Ph. edulis* (Carriere) J. Houzeau) 及乌哺鸡竹 (*Ph. vivax* McClure) 等多种笋用竹种, 造成鲜笋腐烂和退笋, 部分林分鲜笋受害率超 70%, 留养的种笋受害率高达 100%, 严重影响竹笋的产量和质量, 威胁竹笋产业的健康发展^[19]。前期研究表明, 与普通小麦 (*Triticum aestivum* L.)、玉米 (*Zea mays* L.) 等禾本科 (Poaceae) 作物相比, 筛胸梳爪叩甲幼虫偏好取食雷竹笋, 竹笋特有的挥发物可能发挥了重要作用^[20], 但竹笋挥发物的组成及与 CO₂ 的引诱活性差异尚未明确。本研究监测比较雷竹笋挥发物和 CO₂ 释放剂对筛胸梳爪叩甲幼虫的引诱作用, 并鉴定了竹笋挥发物组分, 旨在探索竹林金针虫的寄主定位及识别机制, 为竹林金针虫的高效监测及防控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫、竹笋和 CO₂ 释放剂颗粒

2020 年 3—4 月, 在浙江省德清县雷竹种植区 (120°04'12" E, 30°32'08" N) 采集筛胸梳爪叩甲幼虫, 带回至中国林科院亚热带林业研究所恒温养虫室内饲养 (养虫室温度 20 ± 1 °C, 相对湿度 $60\% \pm 10\%$)。饲养时, 将采集的金针虫用无菌水冲洗数次后, 依据个体大小分装于养虫箱中 (42 cm × 28 cm × 22 cm), 单箱饲养 50 头, 养虫箱中的无菌土湿度控制在 $10\% \pm 1\%$, 于黑暗条件下饲养, 以鲜笋喂食 (定期更换)。试验时选取个体大小相近、龄期一致、健康活跃的幼虫个体供试^[21]。

本研究所选用的竹笋为雷竹笋, 均采自浙江省杭州市富阳区永昌镇雷竹种植区。试验当天, 在雷竹林挖掘新鲜健康竹笋 (笋尖出土 <2 cm) 1000 g, 保鲜带回实验室供试。CO₂ 释放剂颗粒由加拿大农业与食品研究中心 Todd Kabaluk 教授赠送, 主要成分为酵母 (*Saccharomyces cerevisiae* Reess ex Hansen)、小麦淀粉和藻酸钙^[22]。

1.2 双向选择仪

双向选择仪用实木材料 (杉木) 制成, 由中心虫室 B (10 cm × 5 cm × 10 cm) 和左右两侧 2 个大小相同的选择室 A 和 C (15 cm × 10 cm × 10

cm) 所构成 (图 1)。中心虫室两侧隔板 (10 cm × 10 cm × 0.1 cm) 能手动拔除, 使虫室和选择室连通, 金针虫可自由移动。实验结束时再插入隔板, 使中心虫室和选择室分离, 便于统计不同选择端的金针虫数量。中心虫室用于放置供试金针虫, 左右两侧选择室用于放置竹笋或 CO₂ 释放剂颗粒。筛胸梳爪叩甲幼虫在双向选择仪中可自由移动, 空白试验 (两侧均为无菌土) 及同食物诱饵 (等量竹笋) 预实验测定结果表明, 自制双向选择仪对金针虫的选择行为无显著影响 ($G_P=0.06$, $P>0.05$; $G_H=17.71$, $P=0.54$, G 检验, 其中 G_P 指每个处理组合中所有重复选择虫数总量的 G 值; G_H 指重复之间异质性 G 值, 下同)。

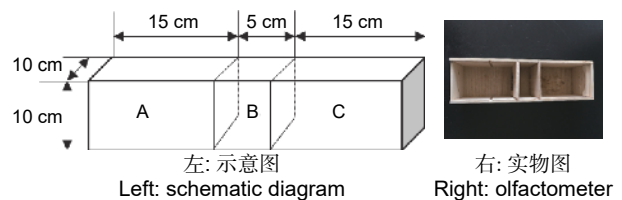


图 1 双向选择仪

Fig. 1 Dual-choice olfactometer for wireworms attraction

1.3 筛胸梳爪叩甲幼虫监测

1.3.1 筛胸梳爪叩甲幼虫对竹笋的行为反应 将 1.75 kg 含水量为 10% 的无菌土加入到双向选择仪内, 水平震荡木盒, 使盒内土面平整, 各部分土壤质地均匀一致, 插入分隔板, 备用。将新鲜雷竹笋 (林地土壤以下的部分) 的中间部分切成若干段, 分别称取 10、20 和 40 g, 作为 3 个处理, 随机埋入双向选择仪的任意一侧选择室的中心, 另一侧选择室作空白对照 (不放置竹笋)。同时, 在中心虫室的无菌土中放入 10 头金针虫 (饥饿 24 h, 下同), 并取出分隔板。24 h 后, 插入分隔板。首先取出中心虫室的无菌土, 在托盘内仔细分离统计其内金针虫的数量 (标记为“未作出选择”), 然后依次统计两侧选择室内金针虫的数量。

上述试验均在黑暗条件下进行 (室内温度 25 ± 1 °C, 相对湿度 $80\% \pm 10\%$), 每个处理共计 20 个重复。

1.3.2 筛胸梳爪叩甲幼虫对 CO₂ 的行为反应 取 CO₂ 释放剂颗粒 10 粒 (2 g)、20 粒 (4 g) 和 40 粒 (8 g), 随机埋入双向选择仪的一侧选择室的中心, 另一侧作为对照。同时, 将 10 头金针虫

在中心虫室的无菌土内释放,并取出隔板。24 h 后统计各区域金针虫的数量。

上述试验均在黑暗条件下进行(室内温度 $25\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度 $80\%\pm 10\%$),每个处理共计 20 个重复。

1.3.3 筛胸梳爪叩甲幼虫的选择行为 取 30 g 雷竹笋和 20 粒 CO_2 释放剂颗粒,分别埋入双向选择仪的左右两侧选择室的中心。同时,在中心虫室内释放 10 头金针虫。设置 24、48 h 两个处理,于 24、48 h 后统计各区域金针虫数量。

上述试验均在黑暗条件下进行(室内温度 $25\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度 $80\%\pm 10\%$),每个处理共计 20 个重复。

1.4 竹笋挥发物组分测定

1.4.1 挥发物收集 利用固相微萃法提取挥发物。称取雷竹笋 50 g,放入洁净的 150 mL 锥形瓶内(锥形瓶使用前用 95% 酒精清洗,并置于烘箱中 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘 120 min),用 Parafilm 封口,静置于实验台上,平衡 30 min。将活化的 SPME 萃取装置(美国 Supelco 公司生产,100 μm PDMS 萃取头)插入锥形瓶内,推出萃取头,使其固定在竹笋上方 5 cm 处,萃取时间为 60 min。萃取结束后,立即将萃取头插入 GC-MS 进样口(Agilent HP 6890GC/5975B)进行解析。实验于暗室中进行(温度 $25\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度 $60\%\sim 70\%$),每组处理 3 个重复。

1.4.2 气-质联用仪操作条件 色谱柱:HP-5MS 毛细管柱(极性,柱长 30 m,内径 0.32 mm,膜厚 25 μm);不分流进样;溶剂延迟 3 min;进样口温度 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$;柱温升温程序为:起始温度 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$,维持 2 min, $14\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$,再以 $25\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 $260\text{ }^{\circ}\text{C}$,维持 7 min。以 99.999% 的高纯氦气作为载气,流量 $1.0\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ [17]。质谱条件:电离方式 EI,电离电压 70 eV,离子源温度 $230\text{ }^{\circ}\text{C}$,电子倍增器电压 1340 V,扫描质量范围 50~550 aum。

1.4.3 挥发物组分鉴定与分析 根据气-质联用仪的分析结果,比对谱库(NIST 2015)中标准化合物的质谱峰,对不同组分进行初步的物质鉴定;然后购买标准品,用二氯甲烷稀释成一定浓度的溶液,按照与样品相同的升温程序和质谱条件,在气-质联用仪中进样 1 μL ,将标准品的保留时间、质谱图和结构与样品中相应峰的保留时间、质谱图

及结构进行比对,从而确定其挥发物组分。挥发物各组分的定量分析,应用峰面积百分比法(某物质峰面积/总物质峰面积 $\times 100\%$)计算各成分的相对含量。

1.5 数据统计分析

选择性试验中,对于金针虫在不同组合和处理间(包括空白对照)的选择偏好均采用重复适合性(Repeated Goodness-of-fit)G 检验。不同质量竹笋间以及不同浓度 CO_2 间的诱虫差异分析均采用 $R\times C$ 列联表卡方检验(Pearson 卡方检验)。利用 DPS 数据处理系统 V19.05(杭州睿丰信息技术有限公司)进行数据分析,采用 Excel 2019、PowerPoint 2019 作图。

2 结果与分析

2.1 筛胸梳爪叩甲幼虫对不同质量竹笋的行为反应

鲜笋诱集试验表明,雷竹鲜笋对筛胸梳爪叩甲幼虫表现出显著的吸引作用(表 1),但不同质量的竹笋间差异不显著($\chi^2=0.576$, $df=2$, $P>0.05$;图 2)。释放金针虫 24 h 后,大多数金针虫选择在埋有竹笋的一端,聚集在竹笋周围或钻入竹笋内蛀食。供试的 200 头金针虫,10 g 竹笋端有 128 头,占供试金针虫的 64.00% ($G_P=69.43$, $P<0.001$; $G_H=21.10$, $P=0.331$;表 1);20 g 竹笋端有 118 头,占供试金针虫的 59.00% ($G_P=61.62$, $P<0.001$; $G_H=23.64$, $P=0.210$;表 1);40 g 竹笋端有 136 头,占供试金针虫的 68.00% ($G_P=84.17$, $P<0.001$; $G_H=8.74$, $P=0.977$;表 1)。释放金针虫 24 h 后,不同处理均有 20% 左右的金针虫仍停留在中心虫室,未作出选择的金针虫在不同质量鲜笋处理中无显著差异(图 2)。

2.2 筛胸梳爪叩甲幼虫对 CO_2 的行为反应

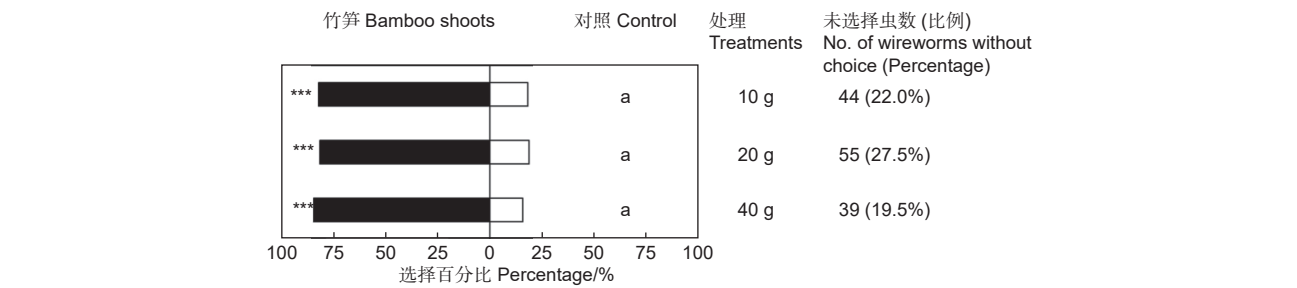
CO_2 对筛胸梳爪叩甲幼虫有显著的吸引作用,且不同浓度的 CO_2 对金针虫引诱力差异显著($\chi^2=7.945$, $df=2$, $P<0.05$;表 2,图 3)。放入 10 粒 CO_2 释放剂颗粒时,供试的 200 头金针虫中 161 头作出了选择, CO_2 端有 99 头,占供试金针虫的 49.50% ($G_P=8.58$, $P<0.01$; $G_H=9.21$, $P=0.970$);放入 20 粒 CO_2 释放剂颗粒时,作出选择的有 141 头, CO_2 端有 107 头,占供试金针虫的 53.50% ($G_P=36.70$, $P<0.001$; $G_H=22.22$, $P=0.274$);放入 40 粒 CO_2 释放剂颗粒时,作出选择的有 149 头, CO_2 端有 107 头,占供试金针

表 1 筛胸梳爪叩甲幼虫对不同质量竹笋的选择

Table 1 Choice tests of *M. crabricollis* larvae towards different weight bamboo shoots in a dual-choice olfactometer

处理 Treatments	重复 Replicates	作出选择的金针虫数量（百分比） Number of wireworms at different sides（Percentage）		G检验 G test	
		处理端 Treated side	对照端 Control side	G _P	G _H
10 g	20	128（82.05%）	28（17.95%）	69.43***	21.10NS
20 g	20	118（81.38%）	27（18.62%）	61.62***	23.64NS
40 g	20	136（84.47%）	25（15.53%）	84.17***	8.74NS

注：仅对作出选择的金针虫个体数进行G检验。***表示 $P<0.001$ ，NS表示差异不显著（ $P>0.05$ ）。下同。
Note: G test was performed only on the number of wireworms at the treated and control sides. *** means $P<0.001$, NS means that the difference is not significant（ $P>0.05$ ）. The same followed.



注：括号中数据指 24 h 后未作出选择金针虫数量及占全部供试金针虫的百分比。字母表示各处理间经多重比较（LSD）在 $P<0.05$ 水平上差异显著性。下同。

Note: The numbers mean the number of wireworm with no choice after 24 hours. The letters show significant difference among treatments at $P<0.05$ based on analysis of variance (LSD). The same followed.

图 2 筛胸梳爪叩甲幼虫对鲜笋的趋向行为

Fig. 2 Preference behavior of *M. crabricollis* larvae towards bamboo shoots in a dual-choice olfactometer

虫的 53.50%（ $G_P=29.33$ ， $P<0.001$ ； $G_H=11.82$ ， $P=0.893$ ）。20 粒 CO₂ 释放颗粒剂对金针虫的引诱力最强，与 10 粒 CO₂ 释放颗粒剂相比有显著差异，但与 40 粒 CO₂ 释放颗粒剂间差异不显著（图 3）。

表 2 筛胸梳爪叩甲幼虫对不同浓度 CO₂ 的选择

Table 2 Choice tests of *M. crabricollis* larvae towards CO₂ of different concentrations in a dual-choice olfactometer

处理 Treatments	重复 Replicates	作出选择的金针虫数量（百分比） Number of wireworms at different sides（Percentage）		G检验 G-test	
		处理端 Treated side	对照端 Control side	G _P	G _H
T ₁	20	99（61.49%）	62（38.50%）	8.58**	9.21NS
T ₂	20	107（75.89%）	34（24.11%）	36.70***	22.22NS
T ₃	20	107（71.81%）	42（28.19%）	29.33***	11.82NS

注：T1、T2、T3分别表示10、20和40粒CO₂释放剂颗粒，下同。**表示 $P<0.01$ 。
Note: T1, T2 and T3 presents 10, 20 and 40 granules of CO₂ resource, respectively. The same followed. ** means $P<0.01$.

2.3 筛胸梳爪叩甲幼虫在竹笋和 CO₂ 间的选择行为

在竹笋和 CO₂ 释放剂颗粒之间，筛胸梳爪叩甲幼虫显著偏好竹笋，竹笋的吸引力强于 CO₂，

但不同的时间处理（24 h 和 48 h）间差异不显著（ $\chi^2=0.314$ ， $df=1$ ， $P>0.05$ ）。供试的 200 头金针虫中，24 h 后竹笋端有 139 头（占供试金针虫的 69.5%），CO₂ 端有 34 头（ $G_P=68.37$ ， $P<$

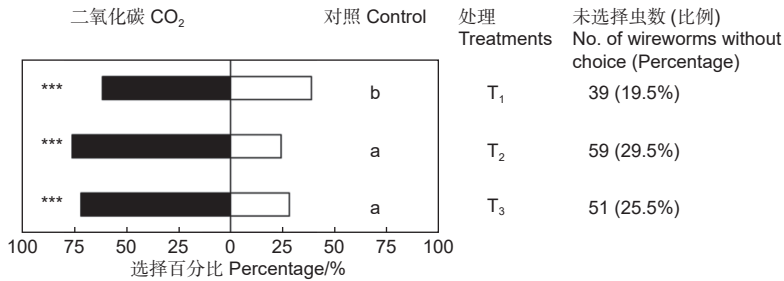


图 3 筛胸梳爪叩甲幼虫对不同浓度 CO₂ 的趋向行为

Fig. 3 Preference behavior of *M. crabricollis* larvae towards CO₂ of different concentrations in a dual-choice olfactometer

0.001; $G_H=15.40$, $P=0.697$; 表 3), 而 48 h 后, 竹筴端有 142 头 (占供试金针虫的 71.0%), CO₂ 端有 35 头 ($G_P=47.69$, $P<0.001$; $G_H=15.40$, $P=0.749$; 表 3)。

表 3 筛胸梳爪叩甲幼虫在竹筴和 CO₂ 释放物间的选择

Table 3 Choice tests of *M. crabricollis* larvae between bamboo shoots and CO₂ resource in a dual-choice olfactometer

处理 Treatments	重复 Replicates	作出选择的金针虫数量 (百分比) Number of wireworms at different sides (Percentage)		G 检验 G-test	
		竹筴 Bamboo shoots	二氧化碳 CO ₂	G _P	G _H
24 h	20	139 (80.35%)	34 (19.65%)	68.37 ***	15.40 NS
48 h	20	142 (80.23%)	35 (19.77%)	47.69 ***	14.58 NS

2.4 雷竹笋挥发物组分

固相微萃取法收集、鉴定雷竹笋挥发物 17 种, 其中萜烯类化合物 7 种 (均是倍半萜), 羧酸类化合物 2 种, 醇类、酯类及酚类化合物各 1 种, 还有 1 种烷烃和 1 种烯烃类化合物 (表 4)。17 种化合物中, 相对含量最高的为烯烃类化合物, 相对含量占比达 66.62%, 其次是倍半萜 (27.98%), 而 7 种倍半萜中以 α -葑草烯含量最高, 占 16.49% (表 4)。

3 讨论

植物挥发物在植食性昆虫搜寻和定位寄主过程中发挥着关键作用, 尤其在黑暗、环境更为复杂的地下植食性昆虫的觅食过程中更为重要^[13,15,23]。大量研究表明, CO₂ 是地下植食性昆虫寄主定位的重要信号物质^[23-24], 如 0.5% 的 CO₂ 对玉米根萤叶甲幼虫有很强的引诱作用^[25], 且 CO₂ 浓度能调节其远距离寄主搜寻和定位行为^[23]。本研究利用 CO₂ 释放剂证实了筛胸梳爪叩甲幼虫 (竹林金针虫) 对土壤中的 CO₂ 表现出显著的吸引作用, 同时 CO₂ 浓度对竹林金针虫的定向移动有显著影

响, 与其它金针虫的相关研究结果吻合^[12,17]。CO₂ 浓度与金针虫行为密切相关, 过低或过高均影响金针虫的定向选择, CO₂ 浓度过低金针虫难以探测, 过高的 CO₂ 浓度对金针虫表现出驱避或毒性作用^[25-26], 研究表明, 4 g CO₂ 释放剂颗粒的引诱效果最佳, 增加 CO₂ 释放剂的量对竹林金针虫的趋向行为影响不显著。

尽管 CO₂ 对金针虫、蛱蛄等地下植食性昆虫有吸引作用, 但土壤环境中 CO₂ 普遍存在且浓度多变, 地下植食性昆虫仍能快速找到寄主, 有学者认为, 地下植食性昆虫在缺乏视觉辅助的情况下, 拥有更为精巧的化学通讯和寄主识别机制。植物在生长过程中, 根系会释放大量的 CO₂ 和自身代谢产物 (初生及次生代谢物), 尤其是次生代谢物对地下昆虫的寄主搜索和选择行为有重要影响^[11,15,27]。本研究中, 在竹筴和 CO₂ 释放剂之间, 筛胸梳爪叩甲幼虫显著偏好竹筴, 这也表明竹筴的挥发物在金针虫寄主搜寻和定位过程中发挥重要作用。

目前对慈竹 (*Bambusa emeiensis* L. C. Chia & H. L. Fung)、麻竹 (*Dendrocalamus latiflorus* Munro) 及绿竹 (*B. oldhamii* Munro) 等丛生竹

表 4 雷竹笋挥发物的成分及其相对含量

Table 4 Relative content (%) and volatile components of *Ph. violascens* shoot collected by HS-SPME

物质峰编号 No. of peak	保留时间 Retention time/min	保留指数 Retention indices/iu	分子式 Molecular formula	化合物名称 Compounds	相对含量±标准误差 Relative content ± SE/%
1	9.12	2 705	C ₂₀ H ₄₀ O	1-(乙烯氧基)-十八烷 1-(ethenyloxy)-octadecane	0.68±0.21
2	10.11	1 180	C ₉ H ₁₀ O	4-(1-甲基乙烯基)-苯酚 4-(1-methylethenyl)-phenol	0.19±0.03
3	10.65	1 471	C ₁₁ H ₂₂ O ₂	十一烷酸 undecanoic acid	0.20±0.05
4	10.96	1 620	C ₁₆ H ₃₂	(Z)-7-十六碳烯 (Z)-7-hexadecene	2.58±0.42
5	11.04	1 413	C ₁₄ H ₃₀	tetradecane 十四烷	0.30±0.06
6	11.28	1 430	C ₁₅ H ₂₄	α-香柠檬烯 α-bergamotene	0.88±0.19
7	11.39	1 494	C ₁₅ H ₂₄	β-石竹烯 β-caryophyllene	3.07±1.87
8	11.60	1 440	C ₁₅ H ₂₄	(Z)-β-farnesene (Z)-β-法呢烯	0.42±0.11
9	11.64	1 446	C ₁₅ H ₂₄	β-倍半水芹烯 β-sesquiphellandrene	1.16±0.08
10	11.71	1 579	C ₁₅ H ₂₄	α-葎草烯 α-humulene	16.49±3.25
11	11.88	1 304	C ₁₃ H ₂₆	1-十三碳烯 1-tridecene	64.04±8.23
12	12.11	1 500	C ₁₅ H ₂₄	β-双油烯 β-bisabolene	2.84±0.98
13	12.23	1 435	C ₁₅ H ₂₄	γ-杜松烯 γ-cadinene	3.12±1.01
14	12.84	1 790	C ₁₆ H ₃₄ O	2-己基-1-癸醇 2-hexyl-1-decanol	0.41±0.03
15	12.91	1 910	C ₁₉ H ₄₀	十九烷 nonadecane	0.84±0.92
16	17.43	1 908	C ₁₆ H ₂₂ O ₄	邻苯二甲酸二异丁酯 diisobutyl phthalate	1.96±0.97
17	18.56	1 968	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	十六烷酸 hexadecanoic acid	0.82±0.31

笋^[28-29], 毛竹^[30-31]和苦竹 (*Pleioblastus amarus* (Keng) Keng f.) 等散生竹笋的挥发物成分研究有过报道。竹笋挥发物组分因竹种、提取方法及提取部位的不同, 挥发物组分差异显著, 呈现出一定的风味特征。本研究采用固相微萃取气质联用法收集鉴定了雷竹笋(地下部分)挥发物组分 17 种, 其中以烯烃和萜烯类化合物为主。萜烯类化合物是最为常见的植物挥发性组分, 在植食性昆虫产卵及搜寻寄主过程中常发挥重要的作用^[32-33]。如 β-caryophyllene 是玉米根萤叶甲^[34]、α-葎草烯是甘薯蚁象 (*Cylas formicarius* Fabr.)^[35]、α-pinene 及 β-pinene 是鳃金龟 (*M. melolontha* L.)^[36] 等地下植食性昆虫幼虫定位寄主的关键信号物质。Barsics 等研究表明, 大麦根释放的 hexanal, (*E*)-hex-2-enal 及 (*E*)-non-2-enal 等 4 种醛类挥发物能吸引金针虫的定向移动^[11]。本研究发现的 α-葎草烯等 7 种相对含量较高的倍半萜, 是否为筛胸梳爪叩甲幼虫定位竹笋的关键物质, 将在后续研究中进一步测定。

大多地下植食性昆虫是世界性重大害虫, 危害周期长、隐蔽性强, 种群动态监测及防治一直是植物保护工作的重点和难点^[37]。近年来, 金针虫在浙

江、福建及江西等核心竹笋产区爆发成灾, 造成重大经济损失, 如何绿色、经济、有效地控制竹林金针虫是竹笋产业健康发展中亟待解决的问题。本研究证实了竹笋挥发物及 CO₂ 对竹林金针虫有显著的吸引作用, 并鉴定了竹笋挥发物组分, 为对竹林金针虫具有引诱活性的信号物质的筛选及基于引诱剂的金针虫 AK 技术 (Attract and kill strategy) 研发提供了重要依据。

4 结论

研究表明, 筛胸梳爪叩甲幼虫对新鲜雷竹笋和 CO₂ 释放剂颗粒均有显著趋性, 在竹笋和 CO₂ 释放剂之间, 筛胸梳爪叩甲幼虫显著偏好新鲜竹笋, 相比 CO₂ 释放剂, 竹笋萌发时所释放的挥发物对竹林金针虫搜寻寄主更为有效。本研究分离鉴定了 17 种可能对筛胸梳爪叩甲幼虫具有吸引作用的萜烯类化合物, 为研发高效的金针虫引诱剂, 探索竹林金针虫的新型防控技术奠定了基础。

参考文献:

[1] Firth J A, Voelkl B, Farine D R, et al. Experimental evidence

- that social relationships determine individual foraging behavior[J]. *Current Biology*, 2015, 25(23): 3138-3143.
- [2] Bennison A, Bearhop S, Bodey T W, *et al.* Search and foraging behaviors from movement data: a comparison of methods[J]. *Ecology and Evolution*, 2018, 8(1): 13-24.
 - [3] Bruce T J A, Wadhams L J, Woodcock C M. Insect host location: a volatile situation[J]. *Trends in Plant Science*, 2005, 10(6): 269-274.
 - [4] Turlings T C J, Erb M. Tritrophic interactions mediated by herbivore-induced plant volatiles: mechanisms, ecological relevance, and application potential[J]. *Annual Review of Entomology*, 2018, 63(1): 433-452.
 - [5] Takabayashi J, Shiojiri K. Multifunctionality of herbivory-induced plant volatiles in chemical communication in tritrophic interactions[J]. *Current Opinion in Insect Science*, 2019, 32: 110-117.
 - [6] Ninkovic V, Markovic D, Rensing M. Plant volatiles as cues and signals in plant communication[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2021, 44(4): 1030-1043.
 - [7] Hunter M D. Out of sight, out of mind: the impacts of root-feeding insects in natural and managed systems[J]. *Agricultural and Forest Entomology*, 2001, 3(1): 3-9.
 - [8] Johnson S N, Gregory P J, Murray P J, *et al.* Host plant recognition by the root feeding clover weevil, *Sitona lepidus* (Coleoptera: Curculionidae)[J]. *Bulletin of Entomological Research*, 2004, 94(5): 433-439.
 - [9] Johnson S N, Rasmann S. Root-feeding insects and their interactions with organisms in the rhizosphere[J]. *Annual Review of Entomology*, 2015, 60(1): 517-535.
 - [10] Johnson S N, Benefer C M, Frew A, *et al.* New frontiers in belowground ecology for plant protection from root-feeding insects[J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 108: 96-107.
 - [11] Barsics F, Delory B M, Delaplace P, *et al.* Foraging wireworms are attracted to root-produced volatile aldehydes[J]. *Journal of Pest Science*, 2017, 90(1): 69-76.
 - [12] Doane J F, Lee Y W, Klingler J, *et al.* The orientation response of *Ctenicera destructor* and other wire worms (Coleoptera: Elateridae) to germinating grain and to carbon dioxide[J]. *The Canadian Entomologist*, 1975, 107(12): 1233-1252.
 - [13] Johnson S N, Nielsen U N. Foraging in the dark—chemically mediated host plant location by belowground insect herbivores[J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2012, 38(6): 604-614.
 - [14] Reinecke A, Müller F, Hilker M. Attractiveness of CO₂ released by root respiration fades on the background of root exudates[J]. *Basic and Applied Ecology*, 2008, 9(5): 568-576.
 - [15] Erb M, Huber M, Robert C A M, *et al.* The role of plant primary and secondary metabolites in root-herbivore behaviour, nutrition and physiology[J]. *Advances in Insect Physiology*, 2013, 45: 53-95.
 - [16] Barsics F, Latine R, Gfeller A, *et al.* Do root-emitted volatile organic compounds attract wireworms[J]. *Communications in Agricultural & Applied Biological Sciences*, 2012, 77(4): 561-565.
 - [17] Barsics F, Haubruge É, Francis F, *et al.* The role of olfaction in wireworms: a review on their foraging behavior and sensory apparatus[J]. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 2014, 18(4): 524-535.
 - [18] Zhang S K, Liu Y N, Shu J P, *et al.* DNA barcoding identification and genetic diversity of bamboo shoot wireworms (Coleoptera: Elateridae) in South China[J]. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 2019, 22(1): 140-150.
 - [19] 舒金平, 滕莹, 陈文强, 等. 筛胸梳爪叩甲的防治技术研究[J]. *林业科学研究*, 2012, 25(5): 620-625.
 - [20] 孟海林. 竹林金针虫寄主搜寻机制初步研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2017.
 - [21] 叶碧欢, 张亚波, 舒金平, 等. 竹林金针虫对绿僵菌及其代谢产物的行为反应[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(4): 997-1002.
 - [22] Brandl M, Schumann M, Przyklenk M, *et al.* Wireworm damage reduction in potatoes with an attract-and-kill strategy using *Metarhizium brunneum*[J]. *Journal of Pest Science*, 2017, 90(2): 479-493.
 - [23] Arce C C M, Theepan V, Schimmel B C J, *et al.* Plant-associated CO₂ mediates long-distance host location and foraging behaviour of a root herbivore[J]. *Elife*, 2021, 10: e65575.
 - [24] Johnson S N, Gregory P J. Chemically - mediated host - plant location and selection by root - feeding insects[J]. *Physiological Entomology*, 2006, 31(1): 1-13.
 - [25] Bernklau E J, Bjostad L B. Behavioral responses of First-Instar western corn root worm (Coleoptera: chrysomelidae) to carbon dioxide in a glass bead bioassay[J]. *Journal of Economic Entomology*, 1998, 91(2): 444-456.
 - [26] Cooper J, Cherry R, Daroub S. Attraction of the corn wireworm, *Melanotus communis* (Coleoptera: Elateridae), to carbon dioxide[J]. *Journal of Agricultural and Urban Entomology*, 2019, 35(1): 30-35.
 - [27] 孟海林, 叶碧欢, 舒金平, 等. 筛胸梳爪叩甲幼虫对不同食物源的趋向行为及头部感器电镜扫描观察[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(8): 2257-2265.
 - [28] 任旺, 叶秀娟, 李婷婷, 等. 麻竹笋中多酚类化合物的提取及挥发性成分分析[J]. *食品科学*, 2014, 35(16): 120-123.
 - [29] Chung M J, Cheng S S, Liu C Y, *et al.* Profiling of volatile compounds with characteristic odors in *Bambusa oldhamii* shoots from Taiwan[J]. *BioResources*, 2021, 16(3): 5901-5914.
 - [30] 杨瑶君, 秦虹, 汪淑芳, 等. 长足大竹象的触角超微结构和对竹笋挥发物的触角电位反应[J]. *昆虫学报*, 2010, 53(10): 1087-1096.
 - [31] Chung M J, Cheng S S, Lin C Y, *et al.* Profiling of volatile com-

pounds of *Phyllostachys pubescens* shoots in Taiwan[J]. Food Chemistry, 2012, 134(4): 1732-1737.

[32] Heil M. Herbivore-induced plant volatiles: targets, perception and unanswered questions[J]. New Phytologist, 2014, 204(2): 297-306.

[33] Hiltbold I, Bernklau E, Bjostad L B, *et al.* Nature, evolution and characterisation of rhizospheric chemical exudates affecting root herbivores[J]. Advances in Insect Physiology., 2013, 45: 97-157.

[34] Robert C A M, Erb M, Duployer M, *et al.* Herbivore-induced plant volatiles mediate host selection by a root herbivore[J]. New Phytologist, 2012, 194(4): 1061-1069.

[35] Wang Y, Kays S J. Sweetpotato volatile chemistry in relation to sweetpotato weevil (*Cylas formicarius*) behavior[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2002, 127(4): 656-662.

[36] Eilers E J, Talarico G, Hansson B S, *et al.* Sensing the underground—ultrastructure and function of sensory organs in root-feeding *Melolontha melolontha* (Coleoptera: Scarabaeinae) larvae[J]. PLoS One, 2012, 7(7): e41357.

[37] Mills N J, Heimpel G E. Could increased understanding of foraging behavior help to predict the success of biological control?[J] Current Opinion in Insect Science, 2018, 27: 26-31.

Larval Behavioural Responses of *Melanotus cribricollis* (Coleoptera: Elateridae) to the Volatiles Emitted from Bamboo Shoot and Carbon Dioxide

ZHANG Wei¹, TENG Ying², HUANG Xu-jun³, LI Zhi-hong¹,
ZHANG Ya-bo¹, SHU Jin-ping¹, WANG Hao-jie¹

(1. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, Zhejiang, China;
2. Agriculture and Rural Bureau of Fuyang District, Hangzhou City, Hangzhou 311400, Zhejiang, China;
3. Central Forestry Station of Suichang, Zhejiang Province, Suichang 323300, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] To understand the mechanism of food foraging below ground of *Melanotus cribricollis* larva which is the dominant and most destructive soil-dwelling insect of bamboo shoots in south China and provide important basic information for the development of effective monitor and control techniques. [Method] We tested the orientation behavior of *M. cribricollis* larvae towards bamboo shoot and CO₂-releasing capsules by using a dual-choice olfactometer. The volatiles emitted from *Phyllostachys violascens* shoot were tentatively identified by solid phase micro-extraction (SPME) coupled with GC-MS, and their relative content were determined as well. [Result] Both bamboo shoot and CO₂ source could significantly induce the directional movement of the larvae of *M. cribricollis*. There was no significant difference in the larval behavior among different weights of bamboo shoots ($P>0.05$), whiel larval orientation behavior was significantly correlated with CO₂ concentration ($P<0.05$). Between bamboo and CO₂-releasing capsules, wireworms preferred significantly to the bamboo shoot ($P<0.05$). A total of 17 compounds emitted from *Ph. violascens* shoot were tentatively identified. The higher relative contents were olefins (66.62%) and sesquiterpenes (27.98%), and the sesquiterpene compound with the highest content was α -humulene. [Conclusion] *M. cribricollis* larvae shows significant stronger orientation towards bamboo shoot and CO₂ source, and prefers bamboo shoot significantly. Compared with CO₂ source, the volatile organic compounds (VOCs) emitted from bamboo shoot show to be more effective in food foraging of bamboo shoot wireworm. In addition, 7 terpene compounds with potential attraction to wireworms are identified in this study, which provides important basic information for the development of attract-and-kill formulations for the control of wireworms.

Keywords: wireworm; root herbivore; carbon dioxide; VOCs; attractant.