

甘蔗和玉米挥发物差异及其对亚洲玉米螟幼虫取食行为的调控作用*

蒋兴川^{1,2,3**} 董文霞² 肖春² 陈斌² 严乃胜² 操海群^{1***} 李正跃^{2***}

(1. 安徽农业大学植物保护学院, 合肥 230036; 2. 云南农业大学植物保护学院, 云南生物资源保护与利用国家重点实验室, 农业生物多样性与病害控制教育部重点实验室, 昆明 650201; 3. 中国农业科学院植物保护研究所, 植物病虫害生物学国家重点实验室, 北京 100193)

摘要 【目的】植物挥发物在昆虫行为中发挥着重要的作用, 通过研究甘蔗 *Saccharum officinarum* 套作玉米 *Zea mays* 系统中植物挥发物对亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis* (Guenée) 幼虫取食行为的影响, 将为利用化学生态手段防治亚洲玉米螟提供依据。【方法】通过气相色谱-质谱联用仪 (GC-MS) 分析了甘蔗分蘖期、玉米拔节期的叶片挥发物, 并利用行为实验测定了 20 种化合物 (5×10^{-3} 、 5×10^{-4} 、 5×10^{-5} 、 5×10^{-6} g/mL) 对亚洲玉米螟幼虫取食行为的影响。【结果】甘蔗和玉米的叶片挥发物成分存在差异, 甘蔗分蘖期、玉米拔节期叶片中依次分离出 49 种、52 种化合物, 其中在甘蔗和玉米叶片中均存在的化合物有 43 种, 甘蔗特有化合物有 6 种, 而玉米特有化合物有 9 种。甘蔗和玉米的挥发物种类主要包括绿叶气味、萜类和脂肪族化合物 (醛类、酮类、酸类、醇类、酯类、酰胺类和烃类), 且这些化合物的含量在甘蔗和玉米之间存在着差异, 但均以烃类化合物的含量最高。顺-罗勒烯、癸酸、二十七烷、二十九烷对初孵幼虫取食表现引诱活性, 壬醛、壬酸、十四烷酸异丙酯、十六烷酸甲酯、二十四烷、二十八烷对初孵幼虫取食行为具有驱避作用。【结论】甘蔗和玉米的叶片挥发物成分存在差异, 差异的化合物对亚洲玉米螟初孵幼虫的取食行为具有调控作用。

关键词 甘蔗, 玉米, 亚洲玉米螟, 植物挥发物, 取食行为

Regulatory effects of different sugarcane and maize leaf volatiles on the feeding behavior of Asian corn borer (*Ostrinia furnacalis*) larvae

JIANG Xing-Chuan^{1,2,3**} DONG Wen-Xia² XIAO Chun² CHEN Bin²
YAN Nai-Sheng² CAO Hai-Qun¹ LI Zheng-Yue^{2***}

(1. College of Plant Protection, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2. College of Plant Protection, Yunnan Agricultural University, State Key Laboratory for Conservation and Utilization of Bio-Resources in Yunnan, Agro-Biodiversity and Pest Management of Education Ministry of China, Kunming 650201, China; 3. Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Beijing 100193, China)

Abstract 【Objectives】Plant volatiles play an important role in insect behavior. How plant volatiles affect the feeding behavior of Asian corn borer (*Ostrinia furnacalis*) larvae in a sugarcane (*Saccharum officinarum*) and maize (*Zea mays*) intercropping system was investigated to provide information to improve control of these pests. 【Methods】Leaf volatiles collected during the sugarcane tiller and maize elongation stages were analyzed with gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). The effects of four doses (5×10^{-3} , 5×10^{-4} , 5×10^{-5} , 5×10^{-6} g/mL) of 20 different compounds on larval feeding behavior were then investigated. 【Results】Leaf volatiles of sugarcane and maize were extracted, and 49 and 52 compounds

*资助项目 Supported projects: 植物病虫害生物学国家重点实验室开放课题 (SKLOF201616); 安徽省高等学校自然科学研究重点项目 (KJ2017A156); 安徽农业大学青年基金重点项目 (2014zr019); 安徽农业大学引进与稳定人才项目 (yj2015-06)

**第一作者 First author, E-mail: jxc678@sina.cn

***共同通讯作者 Co-corresponding authors, E-mail: haiquncao@163.com; lizhengyue@ynau.edu.cn

收稿日期 Received: 2017-01-25, 接受日期 Accepted: 2017-03-22

produced during the sugarcane tiller and maize elongation stages, respectively, were identified. Among these compounds, 43 were extracted from both sugarcane and maize leaves. A further 6 compounds were only found in sugarcane leaves and 9 compounds were only found in maize leaves. The volatiles identified were green leaf volatiles, terpenoids, aliphatic compound (aldehydes, ketones, acids, alcohols, esters, amides, and hydrocarbons), the amounts of which differed between sugarcane leaves and maize leaves. However, hydrocarbons were the most abundant volatile produced by both sugarcane and maize leaves. (Z)-ocimene, decanoic acid, heptacosane and nonacosane were significantly more attractive to Asian corn borer larvae than the control substance, whereas nonanal, nonanoic acid, isopropyl myristate, hexadecanoic acid methyl ester, tetracosane and octacosane repelled larvae. **[Conclusion]** Leaf volatiles produced by sugarcane and maize differ, and these differences can affect the feeding behavior of first-instar Asian corn borer larvae.

Key words sugarcane (*Saccharum officinarum*), maize (*Zea mays*), Asian corn borer (*Ostrinia furnacalis*), plant volatiles, feeding behavior

亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis* (Guenée) 属鳞翅目草螟科, 是我国玉米螟的优势种 (全国玉米螟综合防治研究协作组, 1988); 其食性杂, 寄主范围广, 可危害玉米 *Zea mays* (L.)、甘蔗 *Saccharum officinarum* (L.)、棉花 *Gossypium* spp. 等多种作物, 造成巨大损失 (王振营等, 2000)。目前, 化学杀虫剂仍然是防治亚洲玉米螟的主要措施; 但由于化学防治不仅增加投入, 而且污染环境, 因此, 寻找可持续防治的新途径至关重要 (张颖等, 2010)。

作物多样性合理种植不但可以提高作物产量, 而且可以有效控制害虫种群, 从而减轻作物的受害程度 (Risch, 1983; Zhu *et al.*, 2000)。近年来, 广西省 (罗城县、上思县)、云南省 (弥勒县、新平县) 和海南省 (昌江县、白沙县) 等地开展甘蔗、玉米间作套种示范试验获得成功, 显著提高了经济效益 (侯本军等, 2012)。为了明确甘蔗间作玉米种植模式对亚洲玉米螟的影响, 本课题组进行了一系列的研究。室内观察发现, 饲喂甘蔗茎秆、玉米茎秆及甘蔗玉米混合食物, 导致亚洲玉米螟的发育历期、体重、产卵量及雌雄比产生很大的差异 (苏国连等, 2016); 田间调查发现, 甘蔗间作玉米对亚洲玉米螟的发生为害具有明显的控制作用, 可用于亚洲玉米螟的生态控制 (陈斌等, 2015)。其中, 甘蔗间作玉米的种植模式对亚洲玉米螟雌蛾产卵选择性、幼虫的取食行为具有明显的影响 (蒋兴川等, 2014a; 谗庆安等, 2015); 同时在此间作模式下, 玉米叶片挥发物对初孵幼虫具有引诱作用, 而甘

蔗叶片挥发物却导致初孵幼虫表现出很强的逃逸行为 (蒋兴川等, 2014a)。

由此我们推测甘蔗和玉米叶片的挥发物组分、含量存在着差异, 并且差异的挥发物对亚洲玉米螟初孵幼虫的取食行为具有一定的调控作用。为了验证假设, 本研究拟通过气相色谱-质谱联用 (GC-MS) 技术鉴定分析甘蔗分蘖期和玉米拔节期叶片挥发物, 并通过行为实验检测差异性的挥发物对幼虫取食行为影响; 为从化学生态方面解释甘蔗、玉米套作对亚洲玉米螟幼虫行为的影响提供数据支持, 同时, 筛选出对亚洲玉米螟幼虫取食行为有引诱或者驱避作用的化合物组分, 可为开展亚洲玉米螟的综合治理提供理论依据和实践指导。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试植物 甘蔗 (新台糖 22 号) 和玉米 (会单 4 号) 均为云南常用的种植品种, 采用蒋兴川等 (2014 a) 的种植方法, 在温室内间作种植玉米与甘蔗, 实验期间不喷洒任何农药, 植物长势良好。

1.1.2 供试虫源 亚洲玉米螟采自云南农业大学后山农场玉米试验田, 室内采用宋彦英等 (1999) 的半人工饲料在温度 (26 ± 1) °C、相对湿度 (70 ± 10) %、光周期 14L : 10D 的人工气候箱内连续饲养多代, 幼虫取食实验选择初孵幼虫。

1.1.3 供试试剂 本研究根据甘蔗和玉米叶片挥发物中差异显著的化合物, 参照亚洲玉米螟有电生理活性的化合物(蒋兴川等, 2014b; Jiang *et al.*, 2015), 同时考虑市场标样合成情况, 选取以下 20 种化合物用于幼虫取食行为试验: 绿叶气味: 顺-3-己烯-1-醇 (97.0%, TCI), 萜类: 顺-罗勒烯 (Aldrich, 90.0%), 脂肪族化合物: 醛类: 壬醛 (95.0%, TCI)、癸醛 (95.0%, TCI), 酸类: 壬酸 (97.0%, Acrōs Organics)、癸酸 (99.0%, Acrōs Organics)、十六烷酸 (97.5%, J&K)、9-十八碳烯酸 (97.0%, Acrōs Organics)、十八烷酸 (98.0%, ULTRA Scientific), 酯类: 十四烷酸异丙酯 (96.0%, J&K)、十六烷酸甲酯 (99.90%, ULTRA Scientific), 酰胺类: 顺-9-十八碳烯酰胺 (98.5%, J&K)、顺-13-二十二碳烯酰胺 (98.0%, J&K), 烃类: 二十二烷 (99.0%, J&K)、二十三烷 (98.0%, J&K)、二十四烷 (99.0%, Acrōs Organics)、二十六烷 (95.0%, TCI)、二十七烷 (95.0%, TCI)、二十八烷 (98.0%, TCI)、二十九烷 (98.0%, TCI)。

1.2 方法

1.2.1 甘蔗、玉米叶片挥发物的收集 溶剂漂洗法参照 Udayagiri 和 Mason (1995) 的方法, 并稍作改进: 选取甘蔗分蘖期和玉米拔节期的第 2 至 4 片叶作为供试材料, 实验时剪取、称量 100 g 健康叶片带回实验室, 在 3 个存有二氯甲烷 (色谱纯, 99.99%) 的烧杯中依次漂洗叶片 5~10 s, 然后用滤纸过滤 2 遍。再加入辛烷和壬酸乙酯各 300 ng 作为内标, 用氮吹法浓缩至 100 μ L 后, 在气相色谱-质谱联用仪中进行分析检测。实验过程中取等量的二氯甲烷放在烧杯中作对照, 等待测叶片漂洗结束后, 将对照二氯甲烷采用相同方法过滤、浓缩、检测。上述所有实验操作均在存有冰块的冰盒中进行, 处理和对照各设 4 次重复。

1.2.2 甘蔗、玉米叶片挥发物的鉴定 采用气相色谱-质谱联用仪对漂洗液进行分析, 气相色谱-质谱联用 (GC-MS) 仪条件: 色谱柱为 HP-5 毛细管柱 (30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μ m), 起始温度 40 $^{\circ}$ C,

3 $^{\circ}$ C/min 升温至 80 $^{\circ}$ C, 再以 5 $^{\circ}$ C/min 升温至 260 $^{\circ}$ C, 保持 10 min; 柱前压 100 kPa, 载气为高纯氮气, 流速 1 mL/min, 分流进样, 分流比是 10:1, 进样量 2 μ L; EI 离子源, 电子能量 70 eV, 质子扫描范围 35~500 amu, 四级杆温度 150 $^{\circ}$ C, 离子源温度 230 $^{\circ}$ C, 接口温度 250 $^{\circ}$ C, 柱压 100 kPa。通过核对标准谱库 (Wiley7n.l) 与标准化合物的质谱图, 根据标准化合物的保留时间对挥发物组分进行定性, 通过内标法对各组分进行定量。

1.2.3 亚洲玉米螟幼虫对挥发物单组分取食行为反应的测定 幼虫取食行为参照蒋兴川等 (2014a) 的方法, 实验前用正己烷将上述 20 种化合物配成浓度为 5×10^{-3} 、 5×10^{-4} 、 5×10^{-5} 、 5×10^{-6} g/mL 的溶液; 实验时抽取 200 μ L 待测化合物均匀涂抹在 1 条长方体状人工饲料 (0.8 cm $\times$ 0.8 cm $\times$ 3.0 cm) 表面, 选取等量正己烷为对照; 并将这 2 条人工饲料等距离随机放入同一个圆柱状玻璃瓶 (d $\times$ h=6 cm $\times$ 8 cm) 中, 然后接入 100 头初孵幼虫, 盖上瓶盖, 4 d 后统计饲料上幼虫数量。实验重复 8 组。

$$\text{相对选择率} = \frac{\text{处理端幼虫数}}{\text{处理端幼虫数} + \text{对照端幼虫数}} \times 100\%$$

1.3 数据处理

实验数据采用 Excel 和 SPSS 17.0 软件进行分析, 甘蔗和玉米的挥发物含量差异采用独立样本 *t*-检验进行显著性分析; 幼虫取食行为试验采用卡方检验进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 甘蔗分蘖期、玉米拔节期叶片挥发物组成及含量

套作模式下的甘蔗分蘖期、玉米拔节期叶片中共分离出 58 种化合物, 其中甘蔗分蘖期、玉米拔节期叶片中依次分离出 49 种、52 种化合物 (表 1, 图 1)。甘蔗分蘖期、玉米拔节期叶片中均存在的化合物有 43 种, 包括顺-3-己烯-1-醇、壬醛、壬酸、十六烷酸、十八烷酸、十六烷酸甲酯、二十四烷、二十七烷、二十八烷、二十九烷等物质。甘蔗分蘖期叶片中特有化合物包括

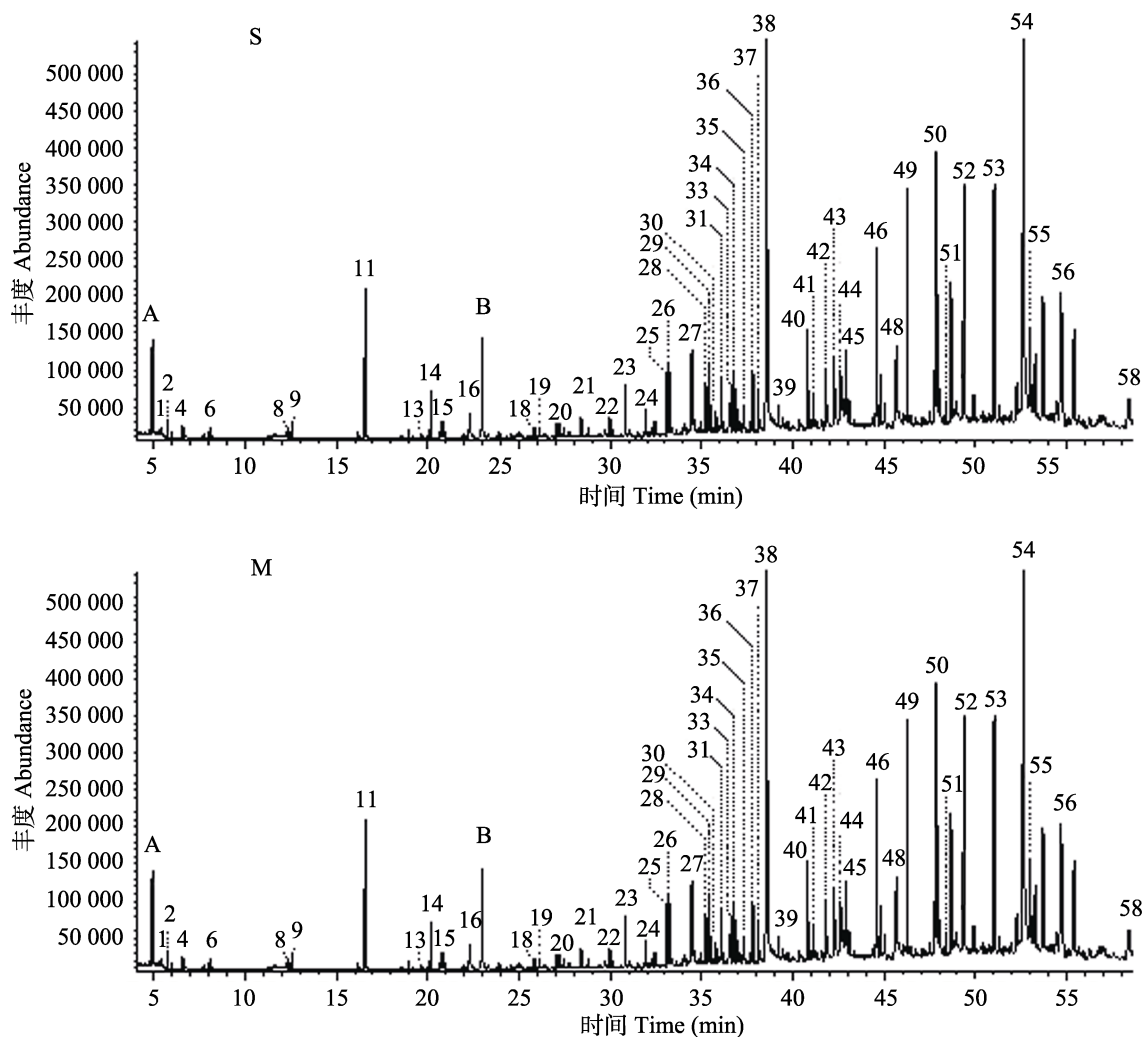


图 1 甘蔗、玉米叶片挥发物的 GC-MS 图

Fig. 1 The GC-MS graph of volatiles emitted from leaves of sugarcane and maize

S: 甘蔗分蘖期; M: 玉米拔节期。S: Sugarcane tillering stage; M: Maize elongation stage.

2-二十五烷酮、9-十八碳烯酸、十四烷酸异丙酯等 6 种物质;玉米拔节期叶片中特有化合物含有顺-罗勒烯、反-2-己烯醛、癸酸等 9 种物质 (表 1)。

套作模式下,甘蔗、玉米叶片挥发物均包括绿叶气味、萜类和脂肪族化合物,含量由大到小的顺序依次为脂肪族化合物、萜类、绿叶气味;其中脂肪族化合物含量丰富,包括醛类、酮类、酸类、醇类、酯类、酰胺类和烃类;且以烃类化合物的含量最高,所占比例均大于 50%,显著高于其他种类化合物 ($P<0.05$, 表 1)。除脂肪族化合物 (酸类、酯类) 外,同一类化合物的总量在甘蔗分蘖期和玉米拔节期间均存在显著差异

($P<0.05$, 表 1)。

2.2 挥发物单组分对亚洲玉米螟幼虫取食行为的影响

亚洲玉米螟初孵幼虫对经正己烷处理的饲料的选择比例为 $48.58\pm 4.18\%$, 稍低于空气对照端;但方差分析结果显示,正己烷处理端与空气对照端幼虫选择比例不存在显著差异 ($P>0.05$)。本研究选取甘蔗和玉米叶片中含量存在差异的 20 种挥发物进行取食行为试验,结果表明,不同化合物对亚洲玉米螟幼虫的取食行为影响不同,并且同一化合物在 4 种浓度下对其幼虫取食行为的影响也存在差异。

表 1 甘蔗分蘖期、玉米拔节期叶片释放的挥发物各组分含量 (ng)
Table 1 Component quantities (ng) of different compounds emitted from leaves of sugarcane
tillering stage and maize elongation stage

化合物 Compounds	保留时间 Retention time (min)	甘蔗分蘖期 Sugarcane tillering stage	玉米拔节期 Maize elongation stage
绿叶气味 Green leaves			
反-2-己烯醛 (E)-2-hexenal	6.487	ND	14.95±3.76*
顺-3-己烯-1-醇 (Z)-3-hexene-1-ol	6.591	39.93±4.15*	4.17±0.82
顺-3-己烯基乙酸酯 (Z)-3-hexenyl acetate	12.503	5.41±1.29	5.89±1.21
合计 Sum		45.34±4.94*	25.01±4.46
萜类 Terpenoids			
顺-罗勒烯 (Z)-ocimene	13.876	ND	21.84±2.15*
α -松油醇 α -terpineol	19.673	5.08±0.67	4.16±0.78
异长叶烯 Isolongifolene	26.107	15.39±1.25	21.97±5.18
香叶基丙酮 (E)-6,10, dimethyl-5,9-undecadien-2-one	27.268	39.93±2.15	32.26±1.74
新植二烯 Neophytadiene	36.019	252.42±13.57*	124.87±16.71
合计 Sum		312.82±14.35*	205.10±22.15
脂肪族化合物 Aliphatic compound			
醛类 Aldehydes			
庚醛 n-heptanal	8.122	40.19±5.35	23.49±4.15
辛醛 Octanal	12.296	9.46±3.87	6.34±0.91
壬醛 Nonanal	16.574	504.83±27.14*	219.98±21.83
癸醛 Decanal	20.164	141.77±7.62	130.43±7.01
合计 Sum		696.25±32.37*	380.24±24.09
酮类 Ketones			
6,10,14-三甲基-2-十五烷酮 6,10,14-trimethyl-2-pentadecanone	36.139	ND	63.13±8.39*
2-二十五烷酮 2-pentacosanone	48.012	166.47±11.95*	ND
2-二十七烷酮 2-heptacosanone	55.993	ND	154.35±12.30*
合计 Sum		166.47±11.95	217.48±18.98*
酸类 Acids			
己酸 Hexanoic acid	11.569	ND	4.83±0.86*
辛酸 Octanoic acid	19.201	ND	3.62±0.19*
壬酸 Nonanoic acid	22.306	181.02±19.73*	68.69±3.69
癸酸 Decanoic acid	25.024	ND	43.38±2.33*
十二烷酸 Dodecanoic acid	29.967	76.13±4.09	50.34±2.71
十四烷酸 Tetradecanoic acid	34.444	394.19±21.19	348.19±18.72
十五烷酸 Pentadecanoic acid	36.512	184.41±13.91	155.74±18.37
顺-7-十六碳烯酸 (Z)-7-hexadecenoic acid	38.085	203.36±27.93	304.53±36.37
十六烷酸 Hexadecanoic acid	38.547	2 291.72±223.22	1 696.72±191.23

续表 1 (Table 1 continued)

化合物 Compounds	保留时间 Retention time (min)	甘蔗分蘖期 Sugarcane tillering stage	玉米拔节期 Maize elongation stage
9-十八碳烯酸 9-octadecenoic acid	41.841	339.04±28.23*	ND
十八烷酸 Octadecanoic acid	42.211	289.98±29.59	407.42±51.91
合计 Sum		3 959.85±256.34	3 083.46±243.97
醇类 Alcohols			
3-戊烯-2-醇 3-penten-2-ol	5.755	57.34±7.16*	16.31±1.52
合计 Sum		57.34±7.16*	16.31±1.52
酯类 Esters			
乙酸丁酯 Acetic acid butyl ester	5.396	15.37±4.26*	4.29±0.49
2-甲基辛酸乙酯 2-methyl octanoic acid ethylester	20.868	67.42±4.51*	ND
十四烷酸异丙酯 Isopropyl myristate	35.789	63.27±3.40*	ND
十六烷酸甲酯 Hexadecanoic acid methyl ester	37.821	214.18±18.52*	83.99±8.52
对甲氧基桂酸-2-乙基己酯 2-propenoic acid, 3-(4-methoxyphenyl)-, 2-ethylhexyl ester	42.274	176.29±9.48*	ND
4,8,12,16-四甲基十七烷基-4-内酯 4,8,12,16-tetramethylheptadecan-4-olide	45.507	ND	530.35±38.51*
合计 Sum		536.53±27.94	618.63±31.97
酰胺类 Amides			
顺-9-十八碳烯酰胺 (Z)-9-octadecenamide	45.613	96.56±16.48	288.40±15.51*
顺-13-二十二碳烯酰胺(Z)-13-docosenamide	52.484	2 869.30±194.27*	2 039.07±149.63
合计 Sum		3 175.86±201.38*	2 327.47±154.87
烃类 Hydrocarbon			
壬烷 Nonane	8.036	ND	5.21±0.67*
十四烷 Tetradecane	25.836	26.39±1.42*	14.21±0.24
十五烷 Pentadecane	28.423	80.87±4.35*	39.77±2.14
十六烷 Hexadecane	30.822	151.59±8.15*	86.21±4.64
2,6,10-三甲基十五烷 2,6,10-trimethyl-pentadecane	31.948	118.76±6.39	89.27±4.80
十七烷 Heptadecane	33.057	162.41±8.73	136.55±7.34
2,6,10,14-四甲基十五烷 2,6,10,14-tetramethyl pentadecane	33.199	279.49±25.03	199.96±18.75
十八烷 Octadecane	35.214	164.78±8.86	138.22±7.43
2,6,10,14-四甲基十六烷 2,6,10,14-tetramethyl hexadecane	35.403	302.83±16.28	264.48±14.22
环十四烷 Cyclotetradecane	36.889	212.83±11.44*	ND
十九烷 Nonadecane	37.279	60.57±3.26	76.76±4.13
二十烷 Eicosane	39.241	70.38±3.78	82.88±4.46
1-十九碳烯 1-nonadecene	40.817	344.11±18.50*	66.47±3.57
二十一烷 Heneicosane	41.111	119.44±6.42	98.45±5.29
二十二烷 Docosane	42.895	306.56±16.48*	159.35±8.57

续表 1 (Table 1 continued)

化合物 Compounds	保留时间 Retention time (min)	甘蔗分蘖期 Sugarcane tillering stage	玉米拔节期 Maize elongation stage
二十三烷 Tricosane	44.573	604.65±32.51*	314.54±16.91
二十四烷 Tetracosane	46.263	704.13±37.86*	356.25±19.16
二十五烷 Pentacosane	47.818	932.86±50.16*	598.48±32.18
二十六烷 Hexacosane	49.336	772.80±41.55*	461.93±24.84
二十七烷 Heptacosane	50.997	930.15±50.01	1 755.40±94.38*
二十八烷 Octacosane	52.798	564.72±30.36*	376.83±20.261
二十九烷 Nonacosane	55.416	603.30±32.44	4 091.21±219.97*
三十烷 Triacontane	58.406	320.77±17.25	408.26±21.95
合计 Sum		7 834.39±312.46	9 820.69±413.87*

各参数为平均值±标准误, ND 指未检测到。同一行数据后标有*表示挥发物的含量在甘蔗和玉米间经 *t*-检验差异显著 ($P<0.05$)。

Parameters in the table are mean±SE, and ND means no detected. Data followed by * in the same line indicate significant difference for volatiles quantity of sugarcane and maize by *t*-test ($P<0.05$).

顺-3-己烯-1-醇 (5×10^{-6} g/mL : $\chi^2=5.255$, $P=0.022$)、顺-罗勒烯 (5×10^{-5} g/mL : $\chi^2=3.998$, $P=0.046$; 5×10^{-6} g/mL : $\chi^2=4.604$, $P=0.032$)、癸酸 (5×10^{-5} g/mL : $\chi^2=9.227$, $P=0.002$; 5×10^{-6} g/mL : $\chi^2=6.697$, $P=0.010$)、二十七烷 (5×10^{-3} g/mL : $\chi^2=12.224$, $P=0.000$; 5×10^{-4} g/mL : $\chi^2=5.952$, $P=0.015$)、二十九烷 (5×10^{-3} g/mL : $\chi^2=9.227$, $P=0.002$; 5×10^{-4} g/mL : $\chi^2=5.255$, $P=0.022$) 等浓度处理下的化合物对与亚洲玉米螟幼虫取食行为具有引诱作用 ;而顺-3-己烯-1-醇 (5×10^{-3} g/mL : $\chi^2=9.227$, $P=0.002$)、壬醛 (5×10^{-3} g/mL : $\chi^2=8.333$, $P=0.004$; 5×10^{-4} g/mL : $\chi^2=5.952$, $P=0.015$)、壬酸 (5×10^{-3} g/mL : $\chi^2=11.171$, $P=0.001$; 5×10^{-4} g/mL : $\chi^2=4.604$, $P=0.032$)、十四烷酸异丙酯 (5×10^{-3} g/mL : $\chi^2=13.333$, $P=0.000$; 5×10^{-4} g/mL : $\chi^2=10.172$, $P=0.001$; 5×10^{-5} g/mL : $\chi^2=5.255$, $P=0.022$)、十六烷酸甲酯 (5×10^{-3} g/mL : $\chi^2=18.364$, $P=0.000$; 5×10^{-4} g/mL : $\chi^2=9.227$, $P=0.002$)、二十四烷 (5×10^{-3} g/mL : $\chi^2=11.171$, $P=0.001$)、二十八烷 (5×10^{-3} g/mL : $\chi^2=5.952$, $P=0.015$) 等浓度处理下的化合物对其幼虫取食行为具有驱避作用。

对比表 1 中甘蔗和玉米叶片挥发物含量可知,对亚洲玉米螟幼虫取食行为具有引诱作用的物质大多在玉米叶片中含量高,或者是玉米叶片中的特有化合物 ;而对其幼虫取食行为具有驱避作用的物质大多在甘蔗叶片中含量高,或者是甘蔗叶片中的特有化合物。

3 讨论

多样性种植模式下植物释放的挥发物等次生性化学物质可以对昆虫的定向、产卵、取食等行为产生影响,从而影响昆虫对作物的危害程度(董文霞等, 2013)。本课题组前期的研究发现,甘蔗间作玉米的种植模式对亚洲玉米螟初孵幼虫的取食行为具有重要的影响 ;其中玉米叶片挥发物对初孵幼虫具有引诱作用,而甘蔗叶片挥发物对初孵幼虫具有驱避作用(蒋兴川等, 2014a)。可见,甘蔗和玉米叶片释放的挥发物在调控初孵幼虫的取食行为中发挥着重要的作用。

植物挥发物按照生物合成途径的不同,主要分为绿叶气味物质、芳香族化合物和萜类化合物等 ;而玉米的上述化合物依次由脂氧合酶途径、类异戊二烯途径和莽草酸途径这 3 个途径合成(Matsui, 2006 ; Pichersky *et al*, 2006 ; Tholl,

表 2 20 种挥发物组分对亚洲玉米螟幼虫取食行为的影响
Table 2 Effects of 20 volatile components on feeding behavior of Asian corn borer larvae

序号 No.	化合物 Compounds	相对选择率 Relative selection rate (%)			
		5×10^{-3} g/mL	5×10^{-4} g/mL	5×10^{-5} g/mL	5×10^{-6} g/mL
1	顺-3-己烯-1-醇(Z)-3-hexene-1-ol	28.97±2.18*	47.82±4.73	49.57±3.55	66.37±2.10*
2	顺-罗勒烯 (Z)-ocimene	47.44±5.75	50.75±5.54	63.75±2.46*	64.67±2.09*
3	壬醛 Nonanal	30.29±2.02*	33.25±2.99*	47.41±3.39	50.19±1.48
4	癸醛 Decanal	47.49±2.68	48.20±3.45	49.54±2.51	48.43±4.13
5	壬酸 Nonanoic acid	27.41±1.53*	35.43±1.59*	51.07±3.50	53.81±5.62
6	癸酸 Decanoic acid	52.64±4.18	54.89±6.09	70.93±2.78*	67.51±2.40*
7	十六烷酸 Hexadecanoic acid	51.45±5.54	52.96±3.92	47.74±2.23	49.91±2.17
8	9-十八碳烯酸 9-octadecenoic acid	44.62±7.52	45.45±5.50	48.37±6.84	50.68±6.36
9	十八烷酸 Octadecanoic acid	46.03±3.76	46.18±2.60	47.72±2.22	48.49±1.94
10	十四烷酸异丙酯 Isopropyl myristate	25.28±2.52**	28.18±2.51**	33.53±2.50*	50.11±5.44
11	十六烷酸甲酯 Hexadecanoic acid methyl ester	21.28±1.95**	29.15±2.19*	48.38±4.98	52.64±5.57
12	顺-9-十八碳烯酰胺 (Z)-9-octadecenamide	44.19±4.14	46.51±4.58	48.08±2.17	48.52±4.56
13	顺-13-二十二碳烯酰胺 (Z)-13-docosenamide	60.38±5.10	55.33±6.73	50.58±4.20	53.01±4.02
14	二十二烷 Docosane	54.61±4.22	51.06±4.26	50.29±4.19	48.94±4.21
15	二十三烷 Tricosane	54.89±4.80	51.89±4.71	50.10±5.26	50.15±5.07
16	二十四烷 Tetracosane	27.13±2.62*	51.24±5.03	51.18±4.44	50.84±4.95
17	二十六烷 Hexacosane	49.41±7.27	50.94±6.26	49.19±5.48	48.90±6.15
18	二十七烷 Heptacosane	73.58±1.94*	66.52±33.48*	50.16±5.11	50.99±5.42
19	二十八烷 Octacosane	35.97±2.19*	39.20±3.35	47.21±2.32	50.77±3.27
20	二十九烷 Nonacosane	71.22±1.34*	65.71±2.75*	50.25±3.88	57.38±4.25

* 表示取食量在处理端和对照端经卡方检验差异显著 ($P < 0.05$)。

* indicates significant difference between the feeding amount of the treatment and that of the control by χ^2 test ($P < 0.05$).

2006)。本研究从甘蔗分蘖期、玉米拔节期叶片中依次分离出的 49 种、52 种化合物，与其他学者关于玉米和甘蔗挥发物的鉴定结果存在着差异。例如，Buttery 和 Ling (1984) 从玉米上分离、鉴定出包括顺-3-己烯-1-醇、顺-3-己烯基乙酸酯在内的 24 种化合物；Perez 等 (1997) 利用 Porapak Q 吸附剂从甘蔗茎秆中提取出乙酸乙酯、丙酸乙酯和丁酸乙酯等 10 种化合物；这可能是由于挥发物收集方法及作物品种的差异，导致结果不同。

本研究分离、鉴定的挥发物为绿叶气味、萜

类和脂肪族化合物，并且均存在顺-3-己烯-1-醇、十四烷酸和二十九烷等多种甘蔗、玉米共有化合物，与课题组之前对玉米苗期和吐丝期、甘蔗苗期和茎伸长期叶片挥发物的分离、鉴定结果一致 (蒋兴川等, 2014b)；这些共性物质可能是禾本科植物分泌的一般性化合物，是由植物常见的生物合成途径产生 (戴建青等, 2010)。同时，不同生育期的甘蔗、玉米叶片挥发物组成及含量也存在着一定的差异，与 Agelopoulos 等 (2000) 关于马铃薯不同生育时期挥发物存在差异的结果一致；这可能是由于植物在生长发育过程中所

受到的环境选择压不同, 导致植物资源分配方式存在差异, 从而使挥发物具有植物种类、品种和生育期的特异性、多样性等特点 (戴建青等, 2010)。其中, 甘蔗分蘖期叶片中含有 2-二十五烷酮、9-十八碳烯酸、十四烷酸异丙酯等 6 种特有化合物, 而玉米拔节期叶片中含有顺-罗勒烯、反-2-己烯醛、癸酸等 9 种特有物质; 这些特异挥发物可能是由于这 2 种植物对环境的适应能力不同导致的, 其组成和结构的复杂性是生物多样性的组成部分, 是生物长期进化的结果, 在昆虫的行为调控中产生了重要的影响。

昆虫与植物次生代谢物的关系一直是昆虫学和害虫防治学研究的重要内容之一。植食性昆虫对寄主植物的选择是一个链式反应过程, 主要包括行为选择和生理表现两个环节; 其中取食行为是昆虫生理代谢中的第一个环节, 影响着昆虫的生长、发育和繁殖; 而植物的理化性质 (尤其是植物的次生代谢物) 是决定昆虫食性的关键因素, 除部分植物次生代谢物被少数专食性昆虫用作取食刺激素外, 大多数植物次生代谢物对昆虫的取食行为具有抑制作用 (孔垂华和姜永根, 2010)。本研究发现, 20 种化合物对亚洲玉米螟幼虫的取食行为影响不同, 其中, 顺-罗勒烯等 4 种化合物对幼虫取食行为具有引诱作用, 壬醛等 6 种化合物对幼虫取食行为具有驱避作用。这些对亚洲玉米螟幼虫取食行为具有引诱作用的物质是玉米叶片中特殊气味或者其含量高于在甘蔗叶片中含量, 而对幼虫取食行为具有驱避作用的物质是甘蔗叶片中特殊气味或其含量高于在玉米叶片中含量; 这些差异的化合物通过共同作用, 刺激或抑制亚洲玉米螟幼虫的嗅觉、味觉感受器, 激发取食相关的神经元活性, 从而调控幼虫行为, 这可能是玉米叶片粗提物对亚洲玉米螟幼虫具有引诱作用, 而甘蔗叶片粗提物驱避其幼虫的原因之一。

本研究发现, 壬醛对亚洲玉米螟幼虫的取食行为具有驱避作用, 与 Huang 等 (2009) 的研究结果一致。绿叶气味顺-3-己烯-1-醇在低浓度处理下 (5×10^{-6} g/mL) 对亚洲玉米螟幼虫取食行为具

有引诱作用, 而在高浓度处理下 (5×10^{-3} g/mL) 对其幼虫取食行为具有驱避作用; 这可能是由于植物次生代谢物质对昆虫的影响存在着浓度效应, 一种次生物质在高浓度下为植物的利己素, 而在低浓度下有可能变为利他素而为昆虫所利用 (孔垂华和姜永根, 2010)。前期研究发现有些对成虫产卵行为有反应的化合物, 在幼虫取食行为中没有影响, 这可能是由于成虫与幼虫的感受器存在差异, 从而导致对化合物的行为反应不同。

鉴于昆虫与植物信息交流的复杂性, 下一步将在本研究的基础上对具有活性的化合物进行不同比例混配, 并通过室内生物测定和田间实验确定各混配组合对亚洲玉米螟幼虫取食行为的影响, 以期筛选出亚洲玉米螟适宜的植物信息素引诱剂或者驱避剂, 为利用化学生态防治亚洲玉米螟提供科学依据。

4 结论

套作模式下的甘蔗分蘖期、玉米拔节期叶片中依次分离出 49 种、52 种化合物, 这些化合物主要包括绿叶气味、萜类和脂肪族化合物 (醛类、酮类、酸类、醇类、酯类、酰胺类和烃类), 且这些化合物的组分及含量在甘蔗和玉米叶片之间存在着差异; 并从这些挥发物中初步筛选出了对亚洲玉米螟初孵幼虫取食行为具有引诱作用的组分——顺-罗勒烯、癸酸、二十七烷、二十九烷, 以及驱避作用的组分——壬醛、壬酸、十四烷酸异丙酯、十六烷酸甲酯、二十四烷、二十八烷。

致谢: 感谢谢兴伟、李祥在挥发物收集时提供的帮助, 以及中国科学院昆明植物研究所余珍老师在植物挥发物鉴定上给予的指导。

参考文献 (References)

- Agelopoulos NG, Chamberlain K, Pickett JA, 2000. Factors affecting volatile emissions of intact potato plants *Solanum tuberosum*: Variability of quantities and stability of ratios. *Journal of Chemical Ecology*, 26 (2): 497–511.

- Buttery RG, Ling LC, 1984. Corn leaf volatiles: Identification using Tenax trapping for possible insect attractants. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 32 (5): 1104–1106.
- Huang CH, Yan FM, Byers JA, Wang RJ, Xu CR, 2009. Volatiles induced by the larvae of the Asian corn borer (*Ostrinia furnacalis*) in maize plants affect behavior of conspecific larvae and female adults. *Insect Science*, 16 (4): 311–320.
- Jiang XC, Dong WX, Chen B, Xiao C, Gui FR, Yan NS, Qian L, Li ZY, 2015. Electrophysiological and oviposition responses of Asian corn borer, *Ostrinia furnacalis* (Lepidoptera: Crambidae), to compounds rinsed from the surfaces of sugarcane and maize leaves. *European Journal of Entomology*, 112(2): 295–301.
- Matsui K, 2006. Green leaf volatiles: Hydroperoxide lyase pathway of oxylipin metabolism. *Current Opinion in Plant Biology*, 9 (3): 274–280.
- Perez AL, Campos Y, Chinchilla CM, Oehlschlager AC, Gries G, Gries R, Giblin-Davis RM, Castrillo G, Peña JE, Duncan RE, Gonzalez LM, Pierce Jr HD, McDonald R, Andrade R, 1997. Aggregation pheromones and host kairomones of west Indian sugarcane weevil, *Metamasius hemipterus sericeus*. *Journal of Chemical Ecology*, 23 (4): 869–888.
- Pichersky E, Noel JP, Dudareva N, 2006. Biosynthesis of plant volatiles: nature's diversity and ingenuity. *Science*, 311 (5762): 808–811.
- Risch SJ, 1983. Intercropping as cultural pest control: prospects and limitations. *Environmental Management*, 7(1): 9–14.
- Tholl D, 2006. Terpene synthases and the regulation, diversity and biological roles of terpene metabolism. *Current Opinion in Plant Biology*, 9 (3): 297–304.
- Udayagiri S, Mason CE, 1995. Host plant constituents as oviposition stimulants for a generalist herbivore: European corn borer. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 76(1): 59–65.
- Zhu YY, Chen HR, Fan JH, Wang YY, Li Y, Chen JB, Fan JX, Yang SS, Hu LP, Leung H, Mew TW, Teng PS, Wang ZH, Mundt CC, 2000. Genetic diversity and disease control in rice. *Nature*, 406(6797): 718–722.
- Chen B, He SQ, Zhang LM, Yang JC, Yan NS, Li ZY, 2015. Control efficacy of maize-sugarcane intercropping against the occurrence and the damage of *Ostrinia furnacalis*. *Journal of Plant Protection*, 42(4): 591–597. [陈斌, 和淑琪, 张立敏, 杨进成, 严乃胜, 李正跃, 2015. 甘蔗间作玉米对亚洲玉米螟发生为害的控制作用. 植物保护学报, 42(4): 591–597.]
- Dai JQ, Han SC, Du JW, 2010. Progress in studies on behavioural effect of semiochemicals of host plant to insects. *Journal of Environmental Entomology*, 32(3): 407–414. [戴建青, 韩诗畴, 杜家伟, 2010. 植物挥发性信息化学物质在昆虫寄主选择行为中的作用. 环境昆虫学报, 32(3): 407–414.]
- Dong WX, Xu N, Xiao C, 2013. The effect of diversified cropping on phytophagous insect behavior. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 50(4): 1133–1140. [董文霞, 徐宁, 肖春, 2013. 作物多样性种植对植食性昆虫行为的影响. 应用昆虫学报, 50(4): 1133–1140.]
- Hou BJ, Lin L, Wang MF, Bai CY, 2012. Economic benefits analysis and the influence for sugarcane of intercropping with maize. *Guangdong Agricultural Sciences*, (15): 9–10, 13. [侯本军, 林力, 王敏芬, 白翠云, 2012. 套种玉米对甘蔗的影响及经济效益分析. 广东农业科学, (15): 9–10, 13.]
- Jiang XC, Xie XW, Li X, Dong WX, Xiao C, Chen B, Yan NS, Li ZY, 2014a. Effect of sugarcane and corn odors on adult oviposition and larvae feeding behaviors of Asian corn borer (*Ostrinia furnacalis*). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51 (3): 615–622. [蒋兴川, 谢兴伟, 李祥, 董文霞, 肖春, 陈斌, 严乃胜, 李正跃, 2014 a. 甘蔗、玉米气味对亚洲玉米螟成虫产卵和幼虫取食的影响. 应用昆虫学报, 51 (3): 615–622.]
- Jiang XC, Xie XW, Dong WX, Xiao C, Chen B, Yan NS, Li X, Li ZY, 2014b. Leaf volatiles of sugarcane and corn during different growth stages and electroantennogram response of the Asian corn borer *Ostrinia furnacalis* to them. *Plant Protection*, 40 (3): 10–19. [蒋兴川, 谢兴伟, 董文霞, 肖春, 陈斌, 严乃胜, 李祥, 李正跃, 2014 b. 甘蔗和玉米不同生育时期叶片挥发物组成及其对亚洲玉米螟的电生理活性. 植物保护, 40 (3): 10–19.]
- Kong CH, Lou YG, 2010. *Frontiers of Chemical Ecology*. Beijing: Higher Education Press. 110–173. [孔垂华, 娄永根, 2010. 化学生态学前沿. 北京: 高等教育出版社. 110–173.]
- Su GL, Chen B, Li ZY, Gui FR, He SQ, 2016. Effects and growth and development of *Ostrinia furnacalis* by feeding with different host plants. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 31(2): 210–217. [苏国连, 陈斌, 李正跃, 桂富荣, 和淑琪, 2016. 4 种寄主植物对亚洲玉米螟生长发育的影响. 云南农业大学学报(自然科学), 31(2): 210–217.]
- Song YY, Zhou DR, He KL, 1999. Studies on mass rearing of Asian Corn Borer: development of a satisfactory non-agar semi-artificial diet and its use. *Acta Phytophylacica Sinica*, 26(4): 324–328. [宋彦英, 周大荣, 何康来, 1999. 亚洲玉米螟无琼脂半人工饲料的研究与应用. 植物保护学报, 26(4): 324–328.]
- The All China Corn Borer Research Group, 1988. Studies on the identification of the dominant corn borer species in China. *Acta Phytophylacica Sinica*, 15(3): 145–152. [全国玉米螟综合防治研究协作组, 1988. 我国玉米螟优势种的研究. 植物保护学报, 15(3): 145–152.]
- Wang ZY, Lu X, He KL, Zhou DR, 2000. Review of history, present situation and prospect of the Asian maize borer research in China. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 31(5): 402–412. [王振营, 鲁新, 何康来, 周大荣, 2000. 我国研究亚洲玉米螟历史、现状与展望. 沈阳农业大学学报, 31(5): 402–412.]
- Zan QA, Zhang L, He SQ, Zhang LM, Chen B, Li ZY, 2015. Oviposition behavior of *Ostrinia furnacalis* (Guenée) (Lepidoptera: Crambidae) on maize intercropped with sugarcane. *Journal of Plant Protection*, 42(1): 10–16. [贻庆安, 张丽, 和淑琪, 张立敏, 陈斌, 李正跃, 2015. 亚洲玉米螟在玉米和甘蔗不同种植模式下的产卵行为. 植物保护学报, 42(1): 10–16.]
- Zhang Y, Fu XW, Zhao GQ, Luo MH, Guo XR, Yuan GH, 2010. Investigation of the ovipositional attraction of *Canna edulis* Ker and several maizes to *Ostrinia furnacalis* (Guenée) moths. *Acta Ecologica Sinica*, 30(2): 408–415. [张颖, 付晓伟, 赵国强, 罗梅浩, 郭线茹, 原国辉, 2010. 蕉藕与几个玉米品种对亚洲玉米螟产卵的诱集作用. 生态学报, 30(2): 408–415.]