

10种柑橘属植物叶片挥发性有机化合物成分分析

张小娇,徐祥增,邓乐晔,张彩虹,万子龙,李思敏,王勇方,高世德*

(云南省热带作物科学研究所,云南景洪 666100)

[摘要]为探究不同柑橘属植物叶片挥发性有机化合物(VOCs)的成分差异,采用动态顶空吸附法结合气相色谱-质谱联用技术,对东试早柚、红宝石柚、越南青柚、鸡尾葡萄柚、冰糖橙、沃柑、香橼、莱檬、宜昌橙、红河大翼橙等10种柑橘属植物叶片的挥发物进行采集和分析,通过峰面积归一法计算化合物的相对含量。结果表明,从10个柑橘属植物叶片中共检测出15种挥发性成分,主要化合物种类包括萜烯类、醇类、醛类、芳香烃类,其中萜烯类化合物的相对含量最高,均达在65%以上。10种柑橘属植物叶片的挥发物组分较为相似,但同一化合物在不同柑橘品种叶片中的含量和比例存在差异,而柠檬醛则是鸡尾葡萄柚和莱檬叶片中特有的化合物,这些化合物在挥发物中的不同占比可能与品种特异性有关。研究结果可为寻找柑橘害虫的引诱剂提供理论依据,为探索植物挥发物与昆虫的关系提供理论基础。

[关键词]柑橘属;挥发性有机化合物;气相色谱-质谱联用(GC-MS)

中图分类号:S666 文献标识码:A 文章编号:1672-450X(2025)04-0005-08

Analysis of Volatile Organic Compounds from the Leaves of 10 *Citrus* Plants

ZHANG Xiaojiao, XU Xiangzeng, DENG Yueye, ZHANG Caihong, WAN Zilong, LI Simin, WANG Yongfang, GAO Shide*

Yunnan Institute of Tropical Crops, Jinghong 666100, China

Abstract: Volatile organic compounds (VOCs) emitted from the leaves of ten *Citrus* taxa-Dongshizao pummelo, Hongbaoshi pummelo, Vietnam green pummelo, Cocktail Grapefruit, Bingtang orange, Orah, Citron, Lime, Ichang papeda, Citrus Hongheensis-were collected by dynamic headspace adsorption and analyzed by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). The relative content of each compound in different varieties was determined using the peak area normalization method. The results showed that a total of 15 chemical classes were identified in the 10 kinds of *Citrus*, including terpenes, alcohols, aldehydes, and phenols, and aromatic hydrocarbons, with terpenes exhibiting the highest relative content, exceeding 65% in all cases. Although the VOCs were qualitatively conserved the leaves of 10 kinds of *Citrus* plants, quantitative variations in individual constituents were evident. Notably, citral was detected exclusively in grapefruit and lime leaves. The observed heterogeneity in the relative abundances of these volatile compounds is likely attributable to varietal specificity. These findings simultaneously establishing a baseline for elucidating the functional relationships between plant-derived volatile organic compounds and insect behaviour.

Key words: *Citrus*; volatile organic compounds; gas chromatography-mass spectrometry(GC-MS)

柑橘是我国种植规模与产量最大的果树,近年来云南的柑橘种植面积极速增加,逐渐发展成为我国柑橘新的主产区^[1-2],但柑橘潜叶蛾(*Phyllocnistis citrella*)、柑橘凤蝶(*Papilio xuthus*)、柑橘蓟

马(*Scirtothrips citri*)、柑橘木虱(*Diaphorina citri*)等害虫以及柑橘溃疡病(citrus canker)、柑橘黄龙病(citrus Huanglongbing)的危害和传播严重制约了云南柑橘产业的发展。目前,柑橘害虫的防治主要

收稿日期:2025-08-05

基金项目:云南省热带作物科学研究所青年成长基金项目(QNCZ2025-11);省所热带作物科技创新专项资金(RF2025-20)

作者简介:张小娇(1994—),女,助理研究员,硕士,研究方向为昆虫化学生态学。E-mail:zhangxiaojiaoxwg@163.com

*通信作者:高世德(1974—),男,副研究员,硕士,研究方向为热带果树栽培。E-mail:gaoshide228@126.com

通过喷洒广谱杀虫剂^[3-4]。但化学防治只能提供短期的保护,需反复施用才能达到效果,不仅成本高昂,还会使害虫产生抗药性,破坏生态平衡,并造成环境污染^[5-7]。

植物挥发性有机化合物(Volatile Organic Compounds, VOCs)是植物通过次生代谢途径合成的小分子化合物,沸点低、挥发性强,在植物-环境互作中扮演关键角色^[8]。VOCs在植食性昆虫的寄主选择和定向行为中起着非常重要的作用,可刺激昆虫的雌雄交配、取食、聚集和传粉等行为^[8-10]。柑橘属植物富含挥发性化合物,具有独特的香味,柑橘叶片 VOCs 主要由单萜类(如柠檬烯、 α -蒎烯)、倍半萜类(如 β -石竹烯)以及绿叶挥发物(如己醛、2-己烯醛)等组成^[11-12]。有研究发现柑橘叶片中的挥发性气味对柑橘粉虱(*Dial-eurodes citri*)具有引诱作用,且不同柑橘品种挥发性气味的引诱效果有差异^[13];椪柑叶片挥发物中罗勒烯、芳樟醇、柠檬烯、月桂烯、苯乙醇等化合物能引起柑橘潜叶蛾的触角电位反应,且在田间对其信息素诱剂有增效作用^[14]。为探究不同柑橘属植物叶片挥发物的成分,以筛选潜在具有引诱效果的化合物,本研究采用动态顶空吸附法提取了10种柑橘属植物叶片的 VOCs,结合气相色谱-质谱联用技术探究不同柑橘品种叶片 VOCs 的组成差异,以期为寻找柑橘害虫的引诱剂提供理论支持,为绿色防控策略的制定提供新思路。

1 材料和方法

1.1 材料

供试植物:云南省热带作物科学研究所柑橘种质资源圃的7类10个柑橘属品种,包括柚类(东试早柚、红宝石柚、越南青柚)、葡萄柚类(鸡尾葡萄柚)、甜橙类(冰糖橙)、杂柑类(沃柑)、枸橼类(香橼)、柠檬类(莱檬)、野生柑橘类(宜昌橙、红河大翼橙)。

1.2 仪器设备

QC-1B型大气采样仪,北京市劳动保护科学研究所;700 mg Porapak Type Q 80~100目吸附剂,美国 Waters 公司;Agilent 6890A 气相色谱仪、Agilent 6890A/5977MS 气相色谱-质谱联用仪,美国

Agilent 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 柑橘叶片挥发物的提取

2024年9月,从云南省热带作物科学研究所柑橘种质资源圃内选取上述各品种长势良好的植株,采集无病虫害的夏梢老熟叶片50片,用蒸馏水清洗擦干水分后备用。采用顶空动态吸附法提取叶片挥发物,实验前对直径150 mm的玻璃干燥器通气10 min以去除其中的气味。玻璃干燥器上部接通2根装有吸附剂(700 mg,美国 Waters 公司)的巴斯德管,其中1根用Teflon 管连接大气采样仪,作为气味吸附收集柱;另1根与活性炭相连接,作为过滤柱净化空气。实验时称量10 g 新鲜的供试柑橘叶片,置于干燥器内,控制空气流量为600 mL/min,连续吸附6 h(8:00—14:00),保持环境通风、无异味,温度为(26±2)℃,相对湿度为(50±10)%,光源为自然光。收集完成后,用2 mL 正己烷把吸附柱上的挥发物洗脱至4 mL 安捷伦棕色储样瓶中,用氮吹法浓缩至100 μL,于-20 ℃冷藏备用。重复3次,设置空白收集系统为对照组。

1.3.2 柑橘叶片挥发物组分的分离与鉴定

利用气相色谱-质谱联用仪 Agilent 7890A / 5977MS 来鉴定分析柑橘叶片挥发物的成分。气相色谱 GC 条件:色谱柱为 HP-5MS 毛细管柱(30 m × 0.25 mm × 0.25 μm,美国 Agilent Technologies 公司),柱箱初始温度为40 ℃,以4 ℃/min 的速度升温至260 ℃;进样口温度为250 ℃;载气为高纯氦气,流速3.0 mL/min,分流进样,分流比是10:1,进样量2 μL。质谱 MS 条件:电离电压为70 eV,质子扫描范围35~500 amu,扫描速度1 666 amu/s,扫描间隔0.3 s,溶剂延迟3 min,离子源温度为230 ℃,接口温度为250 ℃。数据的收集及分析采用GC-MS 解析软件,检索的标准谱库为 NIST 14 和 NIST 14s。

通过对比标准品的保留时间、NIST 标准谱库及保留指数(Retention Index, RI)、NIST Chemistry WebBook^[15]和文献^[16]中的质谱数据和保留指数来进行定性分析;并通过峰面积归一法对各组分相

对含量进行分析。保留指数(RI)的计算方法参考^[17]公式为: RI = 100Y + 100(Z-Y) × (RTx - RTy)/(RTz - RTy)。其中Y和Z是2个标准烷烃的碳原子数目, RTx是待鉴定成分色谱峰的保留时间, RTy和RTz则分别是2个标准烷烃的保留时间。

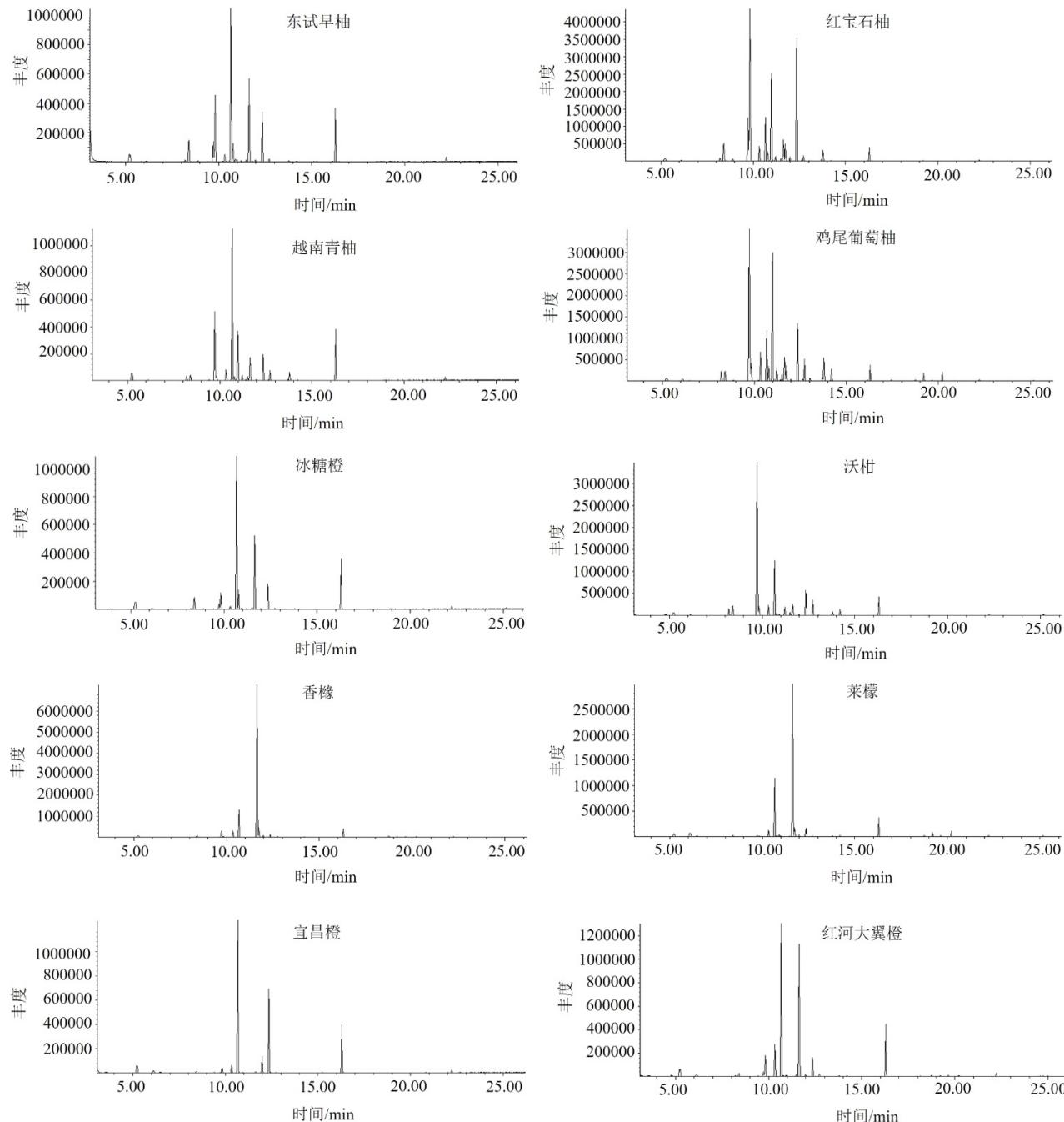


图1 气相色谱-质谱法测定的10种柑橘属叶片挥发性物质总离子色谱

2 结果与分析

2.1 10种柑橘属植物叶片挥发性有机物成分及含量分析

通过气相色谱-质谱联用分析,得到10种柑橘属植物叶片挥发物成分的总离子流图(图1)。

由检测结果(表1)可知,从10种柑橘属植物叶片中共检测出15种挥发性成分,包含萜烯类化合物11种(α -蒎烯、 β -水芹烯、 β -蒎烯、 β -月桂烯、 α -水芹烯、3-蒈烯、2-蒈烯、D-柠檬烯、(E)-

β -罗勒烯、 β -罗勒烯、 γ -萜品烯),醇类2种(顺-3-己烯醇、桉油醇),醛类1种(柠檬醛),芳烃类1种(对聚伞花烃)。

表1 10种柑橘属植物叶片挥发性成分分析

序号	保留时间/ min	化合物	保留 指数	鉴定方法	相对含量/%									
					东试 早柚	红宝 石柚	越南 青柚	鸡尾 葡萄柚	冰糖橙	莱檬	香橼	沃柑	宜昌橙	
1	5.23	顺-3-己烯醇	858	MS, RI, std	7.30	0.46	5.79	0.77	8.46	2.35	1.29	1.77	11.65	3.68
2	8.41	α -蒎烯	939	MS, RI, std	8.99	4.15	2.80	2.62	8.58	—	1.20	4.51	—	1.66
3	9.73	β -水芹烯	1 026	MS, RI	6.99	8.42	30.79	28.67	3.14	—	3.53	59.75	—	—
4	9.73	β -蒎烯	964	MS, RI, std	24.54	31.54	—	3.36	10.83	—	0.28	3.34	4.82	9.97
5	10.34	β -月桂烯	987	MS, RI, std	5.69	2.66	4.18	4.74	—	2.50	3.48	3.36	6.10	13.24
6	10.78	α -水芹烯	1 001	MS, RI	—	1.72	—	2.60	11.57	—	—	—	—	—
7	10.98	3-蒈烯	1 016	MS, RI, std	—	16.32	20.61	22.56	41.17	—	—	—	—	—
8	11.22	2-蒈烯	1 011	MS, RI	—	0.79	—	2.06	—	—	—	2.49	—	—
9	11.50	对聚伞花烃	1 023	MS, RI, std	—	0.50	—	1.27	—	—	—	4.19	—	0.74
10	11.64	D-柠檬烯	1 030	MS, RI, std	28.02	3.98	9.73	4.14	—	59.09	81.13	—	—	54.48
11	11.73	桉油醇	1 038	MS, RI, std	—	3.16	—	2.63	—	3.71	4.87	—	—	—
12	11.99	(E)- β -罗勒烯	1 046	MS, RI, std	—	0.67	—	0.30	—	0.55	—	—	11.82	—
13	12.35	β -罗勒烯	1 040	MS, RI, std	14.41	20.60	9.39	6.30	12.69	2.96	1.01	7.90	60.70	—
14	12.72	γ -萜品烯	1 060	MS, RI, std	—	0.91	3.64	3.23	—	—	4.66	—	—	7.27
15	20.21	柠檬醛	1 216	MS, RI	—	—	—	1.39	—	1.89	—	—	—	—
合计					95.94	95.88	86.93	86.64	96.44	73.05	96.79	91.97	95.09	91.04

注: MS 表示质谱图与 NIST 谱库的对比; RI 表示保留指数与 NIST Chemistry WebBook 对比; std 表示与标准品的保留时间对比; “—”表示未检出。

在东试早柚叶片中检测出7种挥发性化合物,主要成分是D-柠檬烯(28.02%)、 β -蒎烯(24.54%)、 β -罗勒烯(14.41%)、 α -蒎烯(8.99%)等萜烯类化合物,及醇类物质顺-3-己烯醇(7.30%);红宝石柚叶片中鉴定出14种挥发性化合物,主要的化合物为 β -蒎烯(31.54%)、 β -罗勒烯(20.60%)、3-蒈烯(16.32%)、 β -水芹烯(8.42%)等萜烯类化合物,其次是桉油醇(3.16%)、顺-3-己烯醇(0.46%)、对聚伞花烃(0.50%)等化合物;越南青柚叶片中主要有 β -水芹烯(30.79%)、3-蒈烯(20.61%)、D-柠檬烯(9.73%)、 β -罗勒烯(9.36%)等萜烯类化合物,及醇类物质顺-3-己烯醇(5.79%);鸡尾葡萄柚的叶片挥发性化合物种类最丰富,共检测出15种化合物,主要成分包括 β -水芹烯(28.67%)、3-蒈烯(22.56%)、 β -罗勒烯(6.30%)、D-柠檬烯(4.14%)等萜烯类化合物以及桉油醇(2.63%)、柠檬醛(1.39%)、对聚伞花烃

(1.27%)、顺-3-己烯醇(0.77%)等化合物;冰糖橙的叶片中鉴定出7种挥发性化合物,主要成分为3-蒈烯(41.17%)、 β -罗勒烯(12.69%)、 α -水芹烯(11.57%)、 β -蒎烯(10.83%)等萜烯类化合物,及醇类物质顺-3-己烯醇(8.46%)。

莱檬叶片中检测出7种挥发性化合物,D-柠檬烯的相对含量最高,达59.09%,其次是桉油醇(3.71%)、 β -罗勒烯(2.96%)、 β -月桂烯(2.50%)、顺-3-己烯醇(2.35%)等化合物;香橼的叶片挥发性化合物共检测出8种,其中D-柠檬烯的相对含量最高,达81.13%,其次是桉油醇(4.87%)、 β -水芹烯(3.53%)、 β -月桂烯(3.48%)、顺-3-己烯醇(1.29%)等化合物;沃柑叶片中含有9种挥发性化合物,最主要的成分为 β -水芹烯(59.75%),还有 β -罗勒烯(7.90%)、 γ -萜品烯(4.66%)、 α -蒎烯(4.51%)、对聚伞花烃(4.51%)和顺-3-己烯醇(1.77%)等化合物;宜昌橙叶片中只检测到5种挥

发性化合物, β -罗勒烯是最主要的化合物, 相对含量为 60.70%, 其他化合物包括(E)- β -罗勒烯(11.82%)、顺-3-己烯醇(11.65%)、 β -月桂烯(6.10%)、 β -蒎烯(4.82%); 红河大翼橙叶片中共检测出 7 种挥发性化合物,D-柠檬烯相对含量达 54.48%, 其次是 β -月桂烯(13.24%)、 β -蒎烯(9.97%)、 γ -萜品烯(7.27%)等萜烯类化合物和绿叶气味物质顺-3-己烯醇(3.68%)。10 种柑橘属植物叶片挥发物组分中, 东试早柚、红宝石柚、越南青柚、鸡尾葡萄柚、冰糖橙、莱檬、香橼、沃柑、宜昌橙、红河大翼橙中检测出的挥发性化合物分别占挥发性有机化合物总量的 95.94%、95.88%、86.93%、86.64%、96.44%、73.05%、96.79%、91.97%、95.09%、91.04%。

从表 1 可知, 东试早柚等 10 种柑橘属植物样品的挥发性化合物组分较为相似, 顺-3-己烯醇是 10 种柑橘属植物叶片挥发物的共有成分, 但相对含量均较低; D-柠檬烯、 β -罗勒烯、 β -月桂烯、 β -水芹烯、 β -蒎烯、 α -蒎烯这 6 种萜烯类化合物普遍存在于柑橘属植物的叶片挥发性化合物中。同一种化合物在不同柑橘品种中的含量并不相同, 例如 D-柠檬烯在香橼叶片挥发物中占比达 81.13%, 但在红宝石柚和鸡尾葡萄柚中均低于 5%, 而在冰糖橙、沃柑和宜昌橙的叶片中未检出, 柠檬醛则是鸡尾葡萄柚和莱檬叶片中特有的化合物, 分别占其总量的 1.39%、1.89%。

2.2 10 种柑橘属植物叶片挥发性有机化合物种类分析

挥发性有机化合物的种类及含量变化见图 2。从 10 种柑橘属植物叶片挥发性提取物中检测到了萜烯类、醇类、醛类、芳烃类等 4 类化合物, 其中萜烯类和醇类化合物在 10 种柑橘属植物叶片中都被检测到。萜烯类化合物是最主要的化合物, 种类较多且在各柑橘属植物叶片中的相对含量均在 65% 以上, 而醇类化合物只检测到 2 种, 且占比较小; 醛类、芳烃化合物各检测到 1 种, 对聚伞花烃仅在 4 种柑橘属植物叶片中检测到, 而柠檬醛只在鸡尾葡萄柚和莱檬叶片中检测到, 且相对含量均很低。

东试早柚叶片共有 2 种挥发性化合物, 其中

萜烯类 6 种(88.64%)、醇类 1 种(7.30%); 红宝石柚叶片含有 3 类挥发性化合物, 其中萜烯类 12 种(91.76%)、醇类 2 种(3.62%)、芳烃类 1 种(0.50%); 越南青柚叶片共有 2 类挥发性化合物, 其中萜烯类 8 种(81.14%)、醇类 1 种(5.79%); 鸡尾葡萄柚叶片含有 4 类挥发性化合物, 萜烯类 11 种(80.58%)、醇类 2 种(3.40%)、芳烃类 1 种(1.27%)、醛类 1 种(1.39%); 冰糖橙叶片共有 2 类挥发性化合物, 萜烯类 6 种(87.98%)、醇类 1 种(8.46%); 莱檬叶片含有 3 类挥发性化合物, 萜烯类 4 种(65.10%)、醇类 2 种(6.06%)、醛类 1 种(1.89%); 香橼叶片共有 2 类挥发性化合物, 其中萜烯类 6 种(90.63%)、醇类 2 种(6.16%); 沃柑叶片含有 3 类挥发性化合物, 萜烯类 7 种(86.01%)、芳烃类 1 种(4.19%)、醇类 1 种(1.77%); 宜昌橙叶片含有 2 类挥发性化合物, 萜烯类 4 种(83.44%)、醇类 1 种(11.65%); 红河大翼橙共有 3 类挥发性化合物, 萜烯类 5 种(86.62%)、醇类 1 种(3.68%)、芳烃类 1 种(0.74%)。

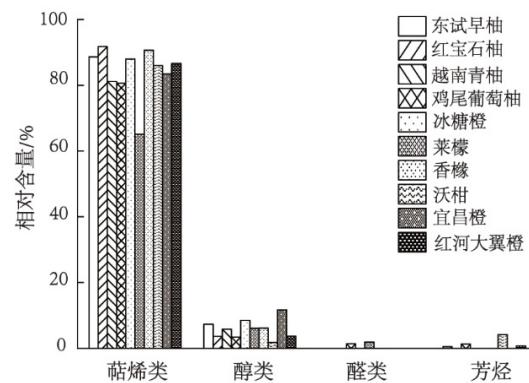


图 2 10 种柑橘属植物叶片挥发物种类的相对含量

3 结论与讨论

本研究采用动态顶空吸附法结合 GC-MS 测定了 10 种柑橘属植物叶片中的挥发性物质, 从中共检测出萜烯类、醇类、醛类、芳烃类等 15 种挥发性成分, 其中萜烯类化合物是柑橘属植物叶片挥发性物质的主要成分, 在 10 种柑橘属植物叶片中的相对含量均在 65% 以上。顺-3-己烯醇作为一种绿叶气味物质, 在 10 种柑橘属植物叶片中均存在; D-柠檬烯、 β -罗勒烯、 β -月桂烯、 β -水芹烯、

β -蒎烯、 α -蒎烯等萜烯类化合物至少在7种柑橘属植物的叶片中存在；柠檬醛则是鸡尾葡萄柚和莱檬叶片挥发物中特有的化合物。

郑瑞等^[14]通过顶空固相微萃取法，从椪柑嫩叶中提取并检测出包括萜烯类、醇类、芳香烃类、酯类、醛类等109种挥发性成分，主要成分为 β -水芹烯(13.94%)、芳樟醇(13.09%)、反式- β -金合欢烯(7.19%)、 γ -榄香烯(6.88%)等萜烯类化合物。对台湾本土和栽培柑橘品种新鲜叶片的挥发性成分进行研究，鉴定出80种挥发性有机化合物，其中芳樟醇含量最高，香茅醛、香叶醛、橙花醛、柠檬烯和反式- β -罗勒烯也是主要的挥发性化合物^[18]。Hetka等^[19]将温州蜜柑等9个柑橘属植物的叶片风干、研磨成粉后，从中鉴定出36种挥发性成分。Rowshan等^[20]发现柠檬叶油中主要成分是蒈烯(40.8%)、芳樟醇(23.2%)和香茅醛(21.7%)，柚叶中的主要成分为桧烯(5.2%)、 β -蒎烯(8.0%)、蒈烯(35.9%)。本研究的检测结果与上述研究在化合物种类及单个化合物的相对含量上存在差异，其原因可能在于供试植物的种类、材料处理方法以及挥发物提取方法存在差异。幼叶通常比成熟叶片释放更多的挥发物^[21]，此外采用顶空固相微萃取法提取植物挥发性化合物的过程中，大多将样品剪碎或研磨，而本研究则是基于植物完整叶片进行提取，这是一种非破坏性提取方法^[22]，可避免机械损伤对次生代谢物产生影响，尽可能地还原植物在自然环境中的状况，对于研究寄主植物与昆虫之间的关系更有意义。

植食性昆虫的寄主选择、取食、交配和产卵等行为很大程度上依赖于寄主植物释放的挥发性物质。几乎所有种类的植食性昆虫都能通过识别寄主植物的挥发性信息化学物质来定位适合自己的寄主^[23-24]。因此，寄主植物挥发物在昆虫定向行为中发挥着重要作用。萜烯类化合物是10种柑橘属植物叶片挥发性化合物中的主要成分，其中D-柠檬烯、 β -罗勒烯、 β -月桂烯、 β -水芹烯、 β -蒎烯、3-蒈烯等在柑橘叶片中普遍存在，且已被证实对昆虫的行为具有调控作用，3-蒈烯和 β -月桂烯对柑橘粉虱具有一定的引诱作

用^[13]； β -罗勒烯、D-柠檬烯、 β -月桂烯可引起柑橘潜叶蛾显著的触角电位反应^[14]； β -罗勒烯能够吸引美国白蛾(*Hyphantria cunea*)成虫^[25]；在行为试验中， β -水芹烯能明显吸引已交配的云斑天牛(*Batocera horsfieldi*)雌虫^[26]；D-柠檬烯是橙子等柑橘类水果的主要挥发物之一，对橘小实蝇(*Bactrocera dorsalis*)具有较好的引诱效果^[27]。另外， β -罗勒烯及其结构类似物可作为植物防御机制启动的信号分子，能吸引植食性昆虫的天敌，如红圆蚧(*Aonidiella aurantii*)为害柑橘时，植株释放 β -罗勒烯可以吸引其天敌印巴黄蚜小蜂(*Aphytis melinus*)^[28-29]。本研究中的这些萜烯类化合物或可作为柑橘害虫或其天敌的引诱剂成分，但还需进一步试验验证。

植物挥发性化合物对某些蛾类昆虫性信息素引诱剂具有增效作用。顺-3-己烯醇可显著增强斜纹夜蛾(*Spodoptera litura*)对性信息素的触角电位反应，提高亚洲玉米螟(*Ostrinia furnacalis*)性信息素的活性^[30-31]；在田间引诱试验中椪柑叶片挥发物罗勒烯能显著提高性信息素对柑橘潜叶蛾雄虫的引诱活性^[14]；将 β -罗勒烯添加在性诱剂中可以显著提高对美国白蛾雄虫的诱捕率^[25]。顺-3-己烯醇在10种柑橘属植物叶片中都存在， β -罗勒烯在除红河大翼橙外的9种柑橘属植物叶片中都被检测到，但这两种化合物对柑橘害虫的性信息素是否有增效作用还有待研究。柠檬醛只在鸡尾葡萄柚和莱檬叶片挥发物中发现，可能与其抗性有关，柠檬醛对昆虫具有毒性，不仅会影响白蚁的行为，还会破坏其表皮几丁质结构，另外柠檬醛对多种细菌和真菌具有抗菌作用^[32-33]。

寄主植物挥发性化合物在植食性昆虫向寄主定位、取食、产卵等行为中发挥着重要作用，同时还对昆虫性信息素起增效作用。本研究结果可为从柑橘属植物中筛选出对柑橘害虫具有引诱作用的植物挥发性化合物提供理论依据。

参考文献：

- [1] 伊华林, 刘慧宇. 我国柑橘品种分布特点及适地适栽品种选择探讨[J]. 中国果树, 2022(1):1-7.

- [2] 蒲成伟,张绩,周上铃,等. 2000年以来我国柑橘产业变化与成本效益分析[J/OL]. 中国农业资源与区划,2025-05-17. <https://link.cnki.net/urlid/11.3513S.20250127.1055.006>.
- [3] MAFI SA, OHBAYASHI N. Toxicity of insecticides to the citrus leafminer, *Phyllocnistis citrella*, and its parasitoids, *Chrysocharis pentheus* and *Sympiesis striatipes* (Hymenoptera: Eulophidae) [J]. Applied Entomology and Zoology, 2006, 41:33-39.
- [4] POWELL AC, BURTON MS, PELOSI R, et al. Seasonal abundance and insecticidal control of citrus leafminer in a citrus orchard[J]. Hort Science, 2007, 42:1636-1638.
- [5] SE'TAMOU M, RODRIGUEZ D, SALDANA R, et al. Efficacy and uptake of soil-applied imidacloprid in the control of Asian citrus psyllid and a citrus leafminer, two foliar-feeding citrus pests[J]. Journal of Economic Entomology, 2010, 103:1711-1719.
- [6] TAN B, HUANG M. Managing the citrus leafminer in China[C]//Proceeding of the international meeting of managing the citrus leafminer, University of Florida, Gainesville, Florida, 1996:49-52.
- [7] GUEDES RNC, SMAGGHE G, STARK JD, et al. Pesticide-induced stress in arthropod pests for optimized integrated pest management programs[J]. Annual Review of Entomology, 2016, 61(1):43-62.
- [8] 孔垂华. 化学生态学前沿[M]. 北京:高等教育出版社, 2010:143-159.
- [9] 杜家纬. 植物-昆虫间的化学通讯及其行为控制[J]. 植物生理学报, 2001, 27(3):193-200.
- [10] HIJAZ F, NEHELA Y, KILLINY N. Possible role of plant volatiles in tolerance against huanglongbing in citrus [J]. Plant Signaling & Behavior, 2016, 11 (3) : e1138193.
- [11] ZHANG H, CHEN M, WEN H, et al. Transcriptomic and metabolomic analyses provide insight into the volatile compounds of citrus leaves and flowers[J]. BMC Plant Biology, 2020, 20(1):7.
- [12] DÖNMEZ S. Determination of volatile components of citrus flowers and leaves growing in Hatay, Türkiye[J]. BioResources, 2024, 19(2):2935-2947.
- [13] 万珊,李绍勤,张宏宇. 柑橘粉虱对柑橘叶片及其挥发物的行为反应[J]. 植物保护学报, 2010, 37(6):522-528.
- [14] 郑瑞. 柑橘潜叶蛾对椪柑挥发物行为反应及其嗅觉相关基因分析[D]. 杭州:浙江农林大学, 2022.
- [15] NIST Mass Spec Data Center. NIST chemistry web book, nist standard reference database number 69 [DB/OL]. 2018-08-15. <http://webbook.nist.gov>.
- [16] ADAMS RP. Identification of essential oil components by gas chromatography/quadrupole mass spectroscopy [M]. Allured Carol Stream, IL, USA : Publishing Corporation, 2001.
- [17] ROBARDS K, ROBARDS K, HADDAD PR, et al. Principles and practice of modern chromatographic methods [M]. New York, USA: Academic Press, 1994.
- [18] LIN SY, ROAN SF, LEE CL, et al. Volatile organic components of fresh leaves as indicators of indigenous and cultivated *Citrus* species in Taiwan[J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2010, 74(4):806-811.
- [19] HETKA NV, ALEHNA AI, SUBOCH VP, et al. Chemical composition of volatile components in the leaves of citrus plants cultivated under greenhouse conditions [J]. Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus, 2018, 62(4):439-446.
- [20] ROWSHAN V, NAJAFIAN S. Headspace analyses of leaf and flower of *Citrus limetta*(lemon), *Citrus maxima* (pomelo), *Citrus sinensis*(orange), and *Citrus medica*(cedrum) for volatile compounds by CombiPAL system technique[J]. Journal of Herbs, Spices and Medicinal Plants, 2013, 19(4):418-425.
- [21] AZAM M, JIANG Q, ZHANG B, et al. Citrus leaf volatiles as affected by developmental stage and genetic type [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2013, 14(9):7744-17766.
- [22] THOLL D, BOLAND W, HANSEL A, et al. Practical approaches to plant volatile analysis[J]. The Plant Journal, 2006, 45(4):540-560.
- [23] 杜永均,严福顺. 植物挥发性物质在植食性昆虫寄主植物和昆虫天敌关系中的作用机理[J]. 昆虫学报, 1994, 37(2):233-249.
- [24] ZHOU S, JANDER G. Molecular ecology of plant volatiles in interactions with insect herbivores[J]. Journal of Experimental Botany, 2021, 73(2):449-462.
- [25] TANG R, ZHANG JP, ZHANG ZN. Electrophysiological and behavioral responses of male fall webworm moths (*Hyphantria cunea*) to herbivory-induced mulberry (*Morus alba*) leaf volatiles [J]. PLoS ONE, 2012, 7 (11) : e49256.
- [26] FAN J, ZHENG K, XIE P, et al. Electrophysiological and behavioral responses of *Batocera horsfieldi* to volatiles from *Pistacia chinensis* bunge [J]. Insects, 2023, 14(12):911.

- [27] LIU L, YANG L, YUAN J, et al. D-limonene is the active olfactory attractant in orange juice for *Bactrocera dorsalis* (Insecta: Diptera: Tephritidae) [J]. *Life*, 2024, 14(6): 713.
- [28] 刘武, 阮颖, 刘春林. 植物防御信号分子 β -罗勒烯的研究进展 [J]. *植物生理学报*, 2012, 48(2): 103-110.
- [29] ISHIWARI H, SUZUKI T, MAEDA T. Essential compounds in herbivore-induced plant volatiles that attract the predatory mite *Neoseiulus womersleyi* [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2007, 33(9): 1670-1681.
- [30] YAO M, ZHANG Z, MENG J, et al. The synergistic electroantennogram responses of *Spodoptera litura* to plant volatiles and sex pheromones [Z]. Research Square Platform LLC, 2022-06-29.
- [31] MA ZN, MA ZC, ZHANG DW, et al. Synergistic effect of corn leaf volatile odor substances on sex pheromone of asian corn borer, *Ostrinia furnacalis* (Guenée) [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 186:012004.
- [32] JIN C, HAN H, XIE Y, et al. Toxicity, behavioral effects, and chitin structural chemistry of *Reticulitermes flavigeeps* exposed to *Cymbopogon citratus* EO and its major constituent citral [J]. *Insects*, 2022, 13(9): 812.
- [33] EL KAHIA H, EL MAAIDEN E, FARIH K, et al. Application of citral as an antifungal agent in the control of post-harvest diseases of citrus fruits: a review [J]. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2025, 23: 102195.