

网络出版时间:2018-02-26 08:48

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2018.06.007

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.s.20180226.0847.014.html>

诱导条件对新疆野苹果树挥发物释放的影响

王 明,崔晓宁,孙可可,刘德广

(西北农林科技大学 植物保护学院,陕西 杨凌 712100)

【摘 要】 【目的】比较健康新疆野苹果(*Malus sieversii*)植株与经过机械损伤、外源茉莉酸甲酯(MeJA)处理和苹果小吉丁虫(*Agrilus mali* Matsumura)成虫危害后的植株释放挥发物组分及含量的差异,了解不同诱导方法对苹果小吉丁虫寄主植物挥发物释放的影响,为开发高效的植物源诱捕剂奠定基础。【方法】采用顶空-固相微萃取法(HS-SPME)收集不同处理新疆野苹果植株挥发物,并使用气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)检测和鉴定挥发物的化学组分及相对含量,同时使用因子分析法和聚类分析法分析其内在联系。【结果】4 种不同处理共收集到 8 大类 58 种挥发性化合物,以酯类、萜烯类、醇类和醛类为主。与健康对照植株释放的挥发物相比,机械损伤处理植株中顺-3-己烯-1-醇和石竹烯的含量有所增加, α -罗勒烯和芳樟醇的含量有所减少;茉莉酸甲酯处理植株中石竹烯和邻伞花烃的含量有所增加,顺-3-己烯-1-醇和香叶基丙酮的含量有所减少;苹果小吉丁虫危害植株中十一烷醇、芳樟醇、石竹烯等物质的含量有所增加,顺-3-己烯-1-醇、乙酸叶醇酯、 α -罗勒烯等物质的含量有所减少。通过因子分析法提取的 3 个主成分分别能够解释挥发物含量变化总方差的 37.65%,23.93%和 19.53%,累积反映原信息量的 81.11%。聚类分析结果表明,健康和茉莉酸甲酯处理植株首先聚为一类,机械损伤和虫害植株则各自归为一类。【结论】机械损伤、茉莉酸甲酯处理及虫害处理等外界因素会导致新疆野苹果树体内挥发性化合物组分在含量和物质种类上发生明显改变,其中对醇类、酯类和萜烯类物质的诱导效果尤为显著,这些物质与新疆野苹果树—苹果小吉丁虫—天敌的三级营养关系和植物诱导化学防御等可能有紧密联系。

【关键词】 茉莉酸甲酯;苹果小吉丁虫;新疆野苹果;挥发物

【中图分类号】 S436.611.2⁺9

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2018)06-0048-11

Effects of different inducing conditions on volatiles released from *Malus sieversii* trees

WANG Ming, CUI Xiaoning, SUN Keke, LIU Deguang

(College of Plant Protection, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 Components and relative contents of volatiles released by healthy *Malus sieversii* trees were compared to those induced by exogenous application of methyl jasmonate (MeJA), mechanically damaged and harmed by *Agrilus mali* adults to provide basis for developing effective baits for pest control. 【Method】 The volatiles from *M. sieversii* trees were collected by the headspace solid-phase micro extraction method, and the chemical components and relative contents were analyzed using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). The principal components and clustering methods were used to determine the internal relations. 【Result】 A total of 8 categories and 58 volatile compounds were collected under four different treatments, mainly including esters, terpenes, alcohols and aldehydes. Compared with control, the contents of (Z)-3-hexen-1-ol and caryophyllene in mechanically damaged plants increased, while contents of

【收稿日期】 2017-04-14

【基金项目】 国家自然科学基金项目(U1503102);国家林业公益性行业科研专项(201404403)

【作者简介】 王 明(1992—),男,陕西商洛人,在读硕士,主要从事昆虫生态与害虫治理研究。E-mail:289110738@qq.com

【通信作者】 刘德广(1972—),男,湖北襄阳人,教授,博士,主要从事昆虫生态与害虫治理研究。E-mail:dgliu@nwsuaf.edu.cn

α -ocimene and linalool decreased. In MeJA treated plants, caryophyllene and o-cymene contents increased and (Z)-3-hexen-1-ol and geranyl acetone contents decreased. In *A. mali* damaged plants, 1-undecanol, linalool and caryophyllene contents increased, while (Z)-3-hexen-1-ol, (Z)-3-hexen-1-ol, acetate, and α -ocimene contents decreased. The first three principal components extracted in the factor analysis explained 37.65%, 23.93% and 19.53% of the total variance with a total of 81.11%. The MeJA treated and healthy trees were grouped into one category, while mechanically damaged plants and *A. mali* damaged trees belonged to separate categories. 【Conclusion】 External factors led to changes in components and contents of volatiles released. These volatiles were likely to be related to the *Malus sieversii*—*A. mali*—natural enemy tritrophic interactions and induced chemical defenses.

Key words: methyl jasmonate; *Agilus mali*; *Malus sieversii*; volatiles

苹果小吉丁虫属鞘翅目(Coleoptera)吉丁虫科(Buprestidae)窄吉丁属(*Agilus*)昆虫,是一种重要的果树蛀干害虫,主要以幼虫在枝条韧皮部和木质部钻蛀取食,破坏输导水分及养分的组织,使枝条干枯死亡;其成虫主要取食叶片补充营养,传播植物病害^[1-2]。据报道,苹果、桃、梨、杏等蔷薇科植物均为苹果小吉丁虫的寄主植物,该虫在管理良好的果园中危害较小^[3]。但近年来,由于苹果小吉丁虫(*Agilus mali* Matsumura)在新疆伊犁的野生苹果林发生极为严重,使得这一世界重要的天然苹果种质基因库资源面临严重威胁,也将影响苹果育种以及苹果产业的可持续发展^[4]。苹果小吉丁虫的危害具有隐蔽性,加之野果林分布区域地形复杂,常规的防治手段防效甚微(如打孔注药或喷杀成虫)^[4]。因此,寻找更好的防治途径是亟待解决的问题。

诱导(如虫害、机械损伤等)产生的植物挥发物在昆虫的化学通讯中起重要作用,能影响植食性昆虫的寄主选择、取食、交配等多种生理行为^[5-6]。相关研究表明,榆紫叶甲(*Ambrostoma quadriimpressum* Motschulsky)危害诱导的家榆(*Ulmus pumila* L.)植株挥发物种类与健康植株存在显著差异,其中芳樟醇、 α -法尼烯和石竹烯等物质对榆紫叶甲雌、雄成虫均具有明显的引诱活性^[7]。当白蜡树(*Fraxinus chinensis* Roxb)受到白蜡窄吉丁(*Agilus planipennis* Fairmaire)取食危害后,其挥发性化学物的组成和含量会发生一定变化,从而对白蜡窄吉丁起直接或间接的防御作用^[8-9]。此外,白蜡吉丁柄腹茧蜂(*Spathius agrili* Yang)对受害后的白蜡树(*Fraxinus chinensis* Roxb)具有显著的趋性行为,猜测这可能与虫害诱导所释放的特定挥发物有密切联系^[10]。马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)植株遭受机械损伤和马铃薯甲虫(*Leptinotarsa decemlineata* Say)危害后,产生的挥发物反-2-己烯醛和

反-2-己烯醇对马铃薯甲虫具有十分强烈的持续引诱效果^[11]。茶丽纹象甲(*Mylocerinus aurolineatus* Voss)危害茶树(*Camellia sinensis*)能诱导挥发物顺-3-己烯醛和乙酸叶醇酯的释放,而其在茶丽纹象甲的寄主选择过程中扮演着重要角色^[12]。总之,害虫类别、危害方式和植物种类等都会改变相关植物的“挥发物组分”,诱导产生的挥发物在昆虫-植物化学通讯中的作用也不尽相同^[13-14]。

另外,Greelman等^[15]发现,茉莉酸甲酯(MeJA)是一种外源诱导性植物激素,具有诱导植物释放特定挥发物的潜力。使用茉莉酸甲酯处理柿树(*Diospyros kaki* Thunb)后,柿树体内释放出的挥发物组分对天敌昆虫红点唇瓢虫(*Chilocorus kuwanae* Silvestri)有强烈吸引作用,能显著提高该瓢虫对日本龟蜡蚧(*Ceroplastes japonicus* Green)的生物防治效果^[16]。其他研究也表明,茉莉酸甲酯处理会影响植物的生理功能,诱导植物“挥发物组分”发生改变,从而产生一定的抗虫效果^[17-18]。但MeJA能否同样诱导野苹果树释放特定有化学通讯功能的挥发物,这些挥发物能否用于减轻苹果小吉丁虫的危害,目前尚未见针对这些问题的研究报道。

聚类分析(如主成分分析等能够根据挥发物的组成和含量将不同试验处理分开,并鉴定不同处理中特征性的挥发物)已成为探讨挥发物组成特征与变化的有效和常用手段,通过该技术可以将试验获得的众多变量采用降维的方法转化为少数几个综合指标,从而进一步探索这些数据中隐藏的信息及本质规律^[19-21]。因此,本研究对机械损伤、外源MeJA处理和苹果小吉丁虫成虫危害后的新疆野苹果(*Malus sieversii*)植株以及健康植株的挥发物释放情况进行了比较,同时使用因子分析和聚类分析方法对相关数据进行进一步分析,以期开发新型植物源诱捕剂、加强对新疆野苹果种质资源保护及发

展苹果小吉丁虫绿色防治策略提供相关的理论和依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试昆虫 2015 年 5 月初,在新疆伊犁哈萨克族自治州新源县野果林采集带虫野苹果枝条,带回实验室后将带虫枝条储存在塑料收纳箱(52 cm×40 cm×35 cm)内,箱底铺有 3~4 cm 厚的湿润细沙(所用细沙需在 70 ℃条件下烘干杀菌晾干后使用)。在实验室条件下待成虫羽化,每天 08:00、14:00 及 20:00 3 个时段观察并收集成虫。塑料方盒(30 cm×24 cm×10 cm)细沙中插入新鲜的垂丝海棠枝条(每个枝条带 5~6 枚叶片),方盒顶部用带若干小孔的塑料保鲜膜覆盖,将收集的成虫分雌雄接入方盒中,每盒饲养 30~40 头成虫,不定期更换新鲜叶片。所需试虫从羽化 1~3 d 内的成虫中选取。试验条件为温度(25±2)℃,相对湿度(RH)(60±5)%,光周期(光/暗)16 h/8 h。

1.1.2 供试植物 2015 年 3 月在西北农林科技大学园艺基地选择长势良好、高度 10 cm 左右的新疆野苹果 2 年生健康苗木(种子来源于新疆伊犁野苹果林),分别栽植于直径 27 cm、高度 17 cm 的花盆内。定期浇施营养液,加强虫害水肥管理,确保其健康成长。

1.1.3 相关试验器材 固相微萃取探头(65 μm DVB/PDMS, Supelco, Bellefonte, PA, USA)和气相色谱-质谱联用仪(TRACE 1310, Thermo Scientific, Waltham, MA, USA)。

1.2 挥发物的收集与鉴定

随机选取高度(约 25 cm)、大小、长势一致且无机械损伤的盆栽健康新疆野苹果幼苗 12 株,分为 4 组,每组 3 株。第 1 组不作任何处理,视为健康对照植株;第 2 组用打孔器在每个叶片上打 1~2 个孔,每株总共打 10~15 个孔,作为机械损伤处理^[22];第 3 组在植株上喷施 0.1 mmol/L 的茉莉酸甲酯^[22](95% purity; Sigma-Aldrich, St. Louis, MO)溶液,喷雾 12 h 后用于试验;第 4 组放入养虫罩(28 cm×28 cm×40 cm)中,每个养虫罩内放置 1 株新疆野苹果幼苗,每株植株上接种 20 头苹果小吉丁成虫(不分雌雄,成虫大小、羽化时间尽量保持一致)^[22],成虫接种前饥饿处理 24 h,取食 48 h 后用于试验。挥发性气味收集均安排在 08:00 至 20:00 进行,每处理设 3 个重复,每个重复中使用 1 株野苹果苗。采

用相同方法收集空玻璃缸和铝箔覆盖的带土无苗花盆中的挥发物作为空白对照。

挥发物的收集采用顶空-固相微萃取法(HS-SPME)。收集前,将铝箔与玻璃缸用蒸馏水反复清洗 3 次,置于烘箱中在 200 ℃条件下烘烤 6~8 h 备用。SPME 手柄(65 μm DVB/PDMS, Supelco, Bellefonte, PA, USA)在首次使用前于 250 ℃条件下老化 3 h,后续使用前老化 20 min 即可。将事先处理好的新疆野苹果幼苗放入玻璃缸内,盖上盖子,插入老化好的 SPME 手柄,25 ℃下萃取 40 min。萃取完成后,直接插入气质联用仪顶空进样端口,250 ℃解吸 10 min,无分流进样,载气为高纯氦气(99.999%),流速 1.0 mL/min。色谱柱为 HP-5MS 毛细管柱(30 m×0.32 mm×0.25 μm; Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA),初始柱温 40 ℃保持 2 min,以 8 ℃/min 升温至 240 ℃,保持 5 min。TIC 检测器,离子源温度 280 ℃,电离能 70 eV,质量扫描范围 45~500 u。

通过 Xcalibur 2.2 (ISQ Thermo Scientific, Waltham, MA, USA)软件进行原始数据采集,以外标物乙酸庚酯(10 ng/μL)为参照,将质谱图和保留指数与 NIST 2011 谱库提供的数据进行比较来鉴定各挥发物组分,用峰面积归一法对各物质组分的相对含量进行定量。

1.3 数据处理与分析

利用 Microsoft Office Excel 2007 对试验数据进行整理,利用 SPSS 20.0 统计软件对整理后的数据进行因子分析(提取主成分)、方差分析和聚类分析,以探讨各处理下挥发物组分的特征。

2 结果与分析

2.1 不同处理新疆野苹果植株挥发物的组分及相对含量

对不同处理下新疆野苹果植株的挥发物进行收集和 GC-MS 分析,结果(表 1)显示,共收集到挥发性化合物 58 种,其中从健康植株收集到 37 种,从机械损伤植株收集到 40 种,从茉莉酸甲酯处理植株收集到 32 种,从虫害植株收集到 34 种。收集到的 58 种挥发物可分为 8 类,包括酯类 14 种(24.14%)、萜烯类 10 种(17.24%)、醇类 8 种(13.79%)、醛类 8 种(13.79%)、烷烃类 6 种(10.34%)、酮类 5 种(8.62%)、醚类 3 种(5.17%)及其他化合物 4 种(6.90%)。可以看出,收集到的挥发物以酯类、萜烯类、醇类和醛类为主。

表 1 不同处理下新疆野苹果植株释放挥发物的质谱分析结果

Table 1 GC-MS analysis of volatiles released from *Malus sieversii* trees under different treatments

类型 Category	编号 No.	化合物名称 Name of compound	相对含量/% Relative content			
			健康对照 Control	机械损伤 Mechanical damage	茉莉酸 甲酯处理 MeJA treatment	苹果小 吉丁虫危害 <i>A. mali</i> feeding
醇类 Alcohols	1	顺-3-己烯-1-醇 (Z)-3-Hexen-1-ol	1.64	2.59	—	—
	2	1-辛烯-3-醇 1-Octen-3-ol	0.08	—	0.27	0.65
	3	2,6-二甲基-7-辛烯-2-醇 2,6-Dimethyl-7-octen-2-ol	0.48	0.20	0.76	1.03
	4	柏木烯醇 8-Cedren-13-ol	0.04	—	—	—
	5	2-亚甲基-4-戊烯-1-醇 2-Methylene-4-penten-1-ol	—	0.83	—	—
	6	5,7-十二烷二炔-1,12-二醇 5,7-Dodecadiyn-1,12-diol	—	—	0.12	—
	7	羟基香茅醇 3,7-Dimethyl-1,7-octanediol	—	—	0.37	—
	8	十一烷醇 1-Undecanol	—	—	—	0.06
醛类 Aldehydes	9	3-己烯醛 3-Hexenal	0.15	0.15	—	—
	10	庚醛 Heptanal	0.06	—	—	—
	11	苯甲醛 Benzaldehyde	0.23	0.07	—	—
	12	辛醛 Octanal	1.15	0.19	—	—
	13	壬醛 Nonanal	2.98	1.72	1.86	4.55
	14	癸醛 Decanal	6.43	1.71	1.00	3.30
	15	十一醛 Undecanal	0.55	0.14	0.10	0.49
	16	十二醛 Dodecanal	0.09	—	—	—
烷烃类 Alkanes	17	十二烷 Dodecane	0.38	—	—	0.36
	18	十四烷 Tetradecane	0.60	0.18	0.57	1.65
	19	十五烷 Pentadecane	2.41	0.53	2.33	4.32
	20	十六烷 Hexadecane	3.64	1.97	2.88	7.48
	21	十七烷 Heptadecane	1.97	0.50	—	3.52
	22	二十烷 Eicosane	1.72	—	1.28	—
酯类 Esters	23	丁酸丁酯 Butanoic acid, butyl ester	0.11	0.04	0.15	0.11
	24	乙酸叶醇酯 (Z)-3-Hexen-1-ol, acetate	32.30	75.02	0.17	15.68
	25	乙酸苜酯 Acetic acid, phenylmethyl ester	0.40	0.11	0.43	0.43
	26	丁酸-3-己烯酯 Butanoic acid, 3-hexenyl ester	0.11	0.71	—	—
	27	水杨酸甲酯 Methyl salicylate	1.00	0.30	1.25	2.65
	28	正戊酸苯酯 n-Valeric acid cis-3-hexenyl ester	0.10	0.47	—	—
	29	鸢尾酯 4-tert-Butylcyclohexyl acetate	0.11	0.09	0.44	0.46
	30	丙酸(2-甲基-2-乙基-3-羟己基)酯 Propanoic acid, 2-methyl-, 2-ethyl-3-hydroxyhexyl ester	0.29	0.12	—	—
	31	2-甲基-丙酸-3-羟基-2,4,4-三甲基戊基酯 Propanoic acid, 2-methyl-3-hydroxy-2,4,4-trimethyl-pentyl ester	0.38	0.06	0.28	1.24
	32	苯甲酸(2-乙基己基)酯 Benzoic acid, 2-ethylhexyl ester	0.24	0.07	0.19	0.44
	33	对甲基苯甲酸(2-乙基己基)酯 p-Toluic acid, 2-ethylhexyl ester	0.12	0.07	—	—
	34	4-己烯-1-醇乙酸酯 4-Hexen-1-ol, acetate	—	27.66	—	0.69
	35	(顺,反)-2-丁烯酸-3-己烯酯 (Z,E)-2-Butenoic acid, 3-hexenyl ester	—	0.23	—	—
	36	三甲基乙酸香芹烯酯 Limonen-6-ol, pivalate	—	—	0.17	—
酮类 Ketones	37	香叶基丙酮 Geranyl acetone	3.21	0.50	—	3.64
	38	5-乙基二氢-2(3h)-呋喃酮 5-Ethylidihydro-2(3h)-furanone	—	0.08	—	—
	39	α -异甲基紫罗兰酮 α -Isomethyl ionone	—	0.07	0.14	0.15
	40	左旋樟脑 1,7,7-Trimethyl-(1s)-bicyclo[2.2.1]heptan-2-one	—	—	0.11	—
	41	植酮 Phytone	—	0.07	0.39	0.68
烯烃类 Alkenes	42	顺,顺,顺-1,4,6,9-十九碳四烯 Z,Z,Z-1,4,6,9-Nonadecatetraene	0.29	—	—	0.17
	43	2-甲基-顺-4-十四烯 2-Methyl-Z-4-tetradecene	—	0.03	0.34	0.15
	44	反-3-二十烯 E-3-Eicosene	—	—	—	0.34
萜类 Terpenoids	45	α -罗勒烯 α -Ocimene	0.42	0.12	0.64	—
	46	α -蒎烯 α -Pinene	0.19	0.08	0.30	0.16
	47	(顺,反)- α -法尼烯 (Z,E)- α -farnesene	1.15	0.34	1.99	1.22
	48	石竹烯 Caryophyllene	—	0.19	1.33	0.64
	49	邻伞花烃 o-Cymene	—	—	0.09	0.13

表 1(续) Contiued table 1

类型 Category	编号 No.	化合物名称 Name of compound	相对含量/% Relative content			
			健康对照 Control	机械损伤 Mechanical damage	茉莉酸 甲酯处理 MeJA treatment	苹果小 吉丁虫危害 <i>A. mali</i> feeding
萜类 Terpenoids	50	α -衣兰烯 α -Ylangene	—	—	0.08	—
	51	芳樟醇 Linalool	0.65	0.38	1.46	1.38
醚类 Ethers	52	癸醚 1,1'-Oxybis-decane	0.10	—	0.08	—
	53	十二烷基二乙二醇醚 Diethylene glycol monododecyl ether	—	0.03	—	—
	54	香叶基乙烯基醚 Geranyl vinyl ether	—	0.03	—	—
	55	甘菊环 Azulene	0.14	0.06	0.23	0.43
其他 Others	56	3-羟基月桂酸 3-Hydroxy-dodecanoic acid	—	0.03	—	0.09
	57	二十二烷酸 Erucic acid	—	—	—	0.15
	58	反-13-十八碳烯酸 trans-13-Octadecenoic acid	—	—	—	0.19

注:表中数据为 3 次重复的平均值,“—”表示未检测到此种挥发物组分。

Note:Each value is the average of three repetitions,and “—”means non-detection.

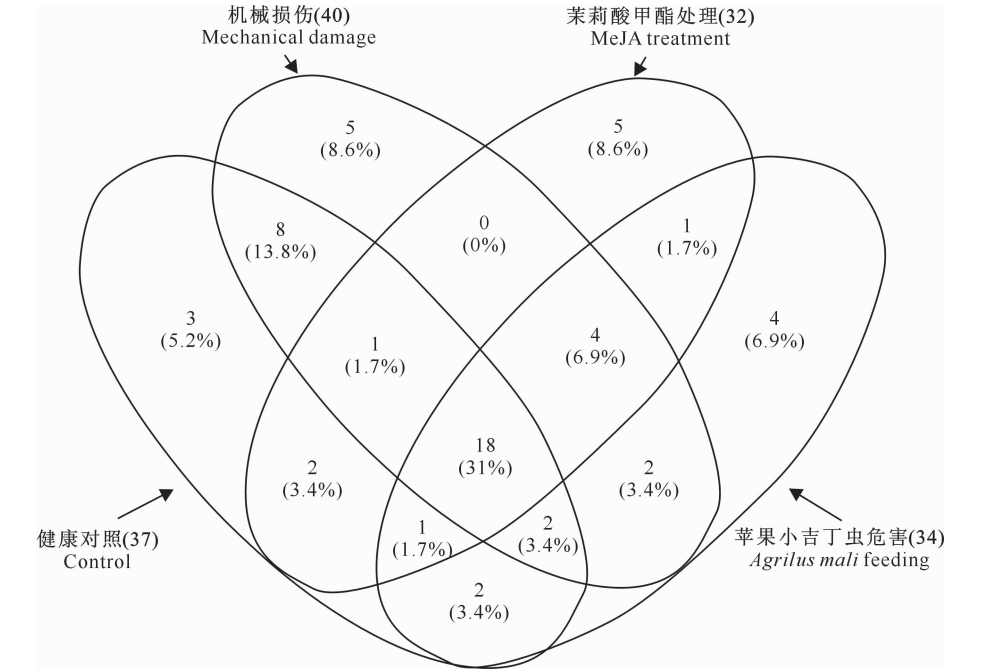
从韦恩图(图 1)和表 1 可以看出,健康植株特有的挥发物共 3 种,分别是柏木烯醇、庚醛、十二醛。机械损伤植株特有的挥发物共 5 种,分别是 2-亚甲基-4-戊烯-1-醇、(顺,反)-2-丁烯酸-3-己烯酯、5-乙基二氢-2(3h)-呋喃酮、十二烷基二乙二醇醚和香叶基乙烯基醚;茉莉酸甲酯处理植株特有的挥发物也是 5 种,分别是 5,7-十二烷二炔-1,12-二醇、羟基香茅醇、左旋樟脑、 α -衣兰烯和三甲基乙酸香芹烯酯;虫害植株特有的挥发物共 4 种,分别是十一烷醇、反-3-二十烯、二十二烷酸和反-13-十八碳烯酸。在健康与机械损伤植株共有而在另外 2 个处理不产生的挥发物有 8 种,分别是顺-3-己烯-1-醇、3-己烯醛、苯甲醛、辛醛、丁酸-3-己烯酯、正戊酸苯酯、丙酸(2-甲基-2-乙基-3-羟己基)酯和对甲基苯甲酸(2-乙基己基)酯。在健康与茉莉酸甲酯植株共有而在另外 2 个处理不产生的挥发物有 2 种,分别是二十烷和癸醚。在健康与虫害植株共有而在另外 2 个处理不产生的挥发物也有 2 种,分别是十二烷和顺,顺,顺-1,4,6,9-十九碳四烯。在机械损伤与虫害植株共有而在另外 2 个处理不产生的挥发物共 2 种,分别是 4-己烯-1-醇乙酸酯和 3-羟基月桂酸。在茉莉酸甲酯处理与虫害植株共有而在另外 2 个处理不产生的挥发物仅有 1 种,是邻伞花烃。在健康、机械损伤与茉莉酸甲酯处理植株中均收集到了 α -罗勒烯,但在虫害植株中却未收集到。4 种不同处理共有的挥发物共 18 种,分别是 2,6-二甲基-7-辛烯-2-醇、壬醛、癸醛、十一醛、十四烷、十五烷、十六烷、丁酸丁酯、乙酸叶醇酯、乙酸苄酯、水杨酸甲酯、鸢尾酯、2-甲基-丙酸-3-羟基-2,4,4-三甲基戊基酯、苯甲酸(2-乙基己基)酯、芳樟醇、 α -蒎烯、(顺,反)- α -法尼烯和甘菊环。与健康植株相比,其他 3 个处理共收集到了 21 种新物

质,其中这 3 个处理中共有的新物质仅 4 种,分别是 α -异甲基紫罗兰酮、植酮、石竹烯和 2-甲基-顺-4-十四烯。

从挥发物含量可以看出,4 种处理之间挥发物含量存在显著差异。与健康植株释放的挥发物相比,机械损伤植株中顺-3-己烯-1-醇、2-亚甲基-4-戊烯-1-醇、乙酸叶醇酯、4-己烯-1-醇乙酸酯、石竹烯等物质含量有所增加,但 1-辛烯-3-醇、癸醛、十五烷、十七烷、水杨酸甲酯、香叶基丙酮、 α -罗勒烯、 α -蒎烯、(顺,反)- α -法尼烯、芳樟醇等物质含量有所减少;茉莉酸甲酯处理植株中 1-辛烯-3-醇、鸢尾酯、植酮、石竹烯、 α -罗勒烯、 α -蒎烯、(顺,反)- α -法尼烯、芳樟醇、邻伞花烃等物质含量有所增加,但顺-3-己烯-1-醇、3-己烯醛、十七烷、乙酸叶醇酯、香叶基丙酮、顺,顺,顺-1,4,6,9-十九碳四烯等物质含量有所减少;苹果小吉丁虫危害植株中 1-辛烯-3-醇、十一烷醇、十六烷、鸢尾酯、水杨酸甲酯、4-己烯-1-醇乙酸酯、植酮、反-3-二十烯、(顺,反)- α -法尼烯、芳樟醇、石竹烯等物质含量有所增加,但顺-3-己烯-1-醇、3-己烯醛、乙酸叶醇酯、丁酸-3-己烯酯、 α -罗勒烯、 α -蒎烯等物质含量有所减少。总体上,与健康对照植株释放的挥发物相比,其他 3 个处理植株中含量变化比较大的物质主要包括顺-3-己烯-1-醇、3-己烯醛、乙酸叶醇酯、丁酸-3-己烯酯、4-己烯-1-醇乙酸酯、植酮、反-3-二十烯、 α -罗勒烯、 α -蒎烯、(顺,反)- α -法尼烯、芳樟醇、石竹烯等。与机械损伤植株释放的挥发物相比,茉莉酸甲酯处理植株中的顺-3-己烯-1-醇、2-亚甲基-4-戊烯-1-醇、3-己烯醛、十七烷、丁酸-3-己烯酯、4-己烯-1-醇乙酸酯和香叶基丙酮等物质含量明显减少,而 1-辛烯-3-醇、十五烷、壬醛、鸢尾酯、左旋樟脑、植酮、 α -罗勒烯和(顺,反)- α -法尼烯等物质

含量有所增加;苹果小吉丁虫危害植株上的 1-辛烯-3-醇、十五烷、十七烷、壬醛、水杨酸甲酯、鸢尾酯、香叶基丙酮、植酮、芳樟醇等物质含量显著增加,但 2-

亚甲基-4-戊烯-1-醇、乙酸叶醇酯、4-己烯-1-醇乙酸酯、 α -罗勒烯等物质含量显著减少。



图中数字以及百分数分别表示处理间共有挥发物种类数量及占挥发物种类总数的百分比
Numbers are amounts of shared volatiles between treatments and percentages to the total number of volatiles

图 1 4 种不同处理之间新疆野苹果植株释放挥发物差异韦恩图

Fig. 1 Venn diagram of different volatiles released from *Malus sieversii* tress under four treatments

2.2 不同处理新疆野苹果挥发物含量的主成分分析

由表 2 可以看出,第 1 主成分的特征值为 21.84,贡献率为 37.65%;第 2 主成分的特征值为 13.88,贡献率为 23.93%;第 3 主成分的特征值为 11.33,贡献率为 19.53%。所提取的 3 个主成分的累积贡献率达到 81.11%,表明这 3 个主成分解释的信息量涵盖了收集到的 58 种物质总信息量的 81.11%。

表 2 因子分析中前 3 个主成分的特征值与贡献率及方差分析结果

Table 2 Eigenvalues and ratios of the first three principal components (PC) in factor analysis and their ANOVA results					
主成分 Principal component	特征值 Eigenvalue	贡献率/% Proportion	累积贡献率/% Cumulative	F 值 F value	自由度 df
第 1 主成分 PC 1	21.84	37.65	37.65	318.18	3,8
第 2 主成分 PC 2	13.88	23.93	61.58	35.26	3,8
第 3 主成分 PC 3	11.33	19.53	81.11	5.75	3,8

主成分 Principal component	P 值 P value	多重比较 Multiple comparisons			
		健康对照 Control	机械损伤 Mechanical damage	茉莉酸甲酯处理 MeJA treatment	苹果小吉丁虫危害 <i>Agrilus mali</i> feeding
第 1 主成分 PC 1	<0.001	0.33±0.07 c	1.59±0.08 a	0.96±0.18 b	0.30±0.03 c
第 2 主成分 PC 2	<0.001	0.27±0.17 c	0.36±0.03 c	0.98±0.20 b	1.51±0.12 a
第 3 主成分 PC 3	<0.05	1.34±0.09 a	0.22±0.04 c	0.70±0.03 b	0.42±0.15 b

注:对所提取的 3 个主成分得分值进行单因素方差分析,并使用 Tukey's HSD 检验比较不同处理间的差异显著性($P<0.05$)。表中数据后标不同小写字母表示处理间差异显著。

Note:One way ANOVA was performed on the three principal components;Tukey's HSD tests were then used for treatment mean separations ($P<0.05$);Different lowercase letters indicate significant differences among treatments.

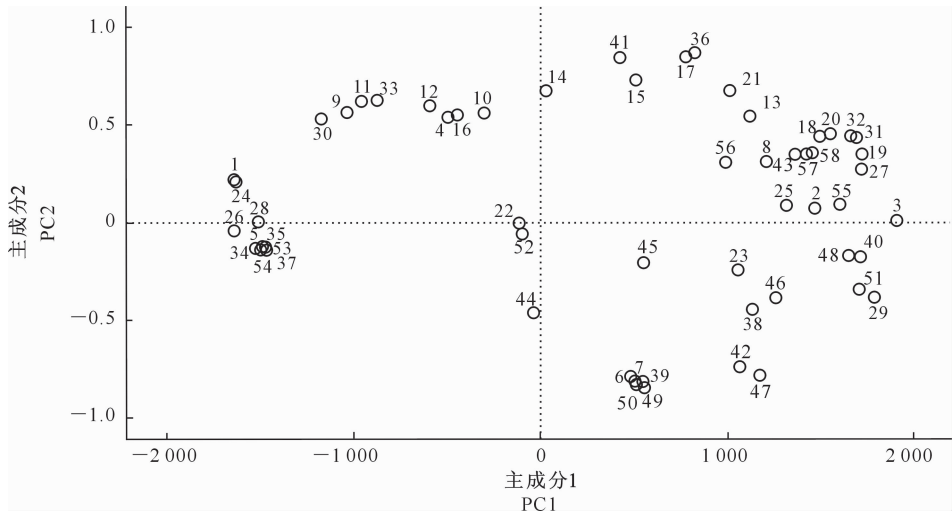
方差分析结果表明,在第 1 主成分上,机械损伤贡献最大,茉莉酸甲酯处理次之,两者均与其他 2 个

处理之间存在显著差异。在第 2 主成分上,虫害处理贡献最大,且与其他 3 组处理之间均差异显著;茉

莉酸甲酯处理贡献也较大,显著高于健康对照和机械损伤。在第 3 主成分上,健康对照贡献最大,与其他 3 组处理之间均差异显著;茉莉酸甲酯和虫害处理之间差异不显著,但两者均与机械损伤处理差异达到显著水平。

以第 1 主成分和第 2 主成分作为 x 轴和 y 轴做出 58 种挥发物的二维分布散点图,结果见图 2。由图 2 可以看出,所有 8 类物质在 4 个象限均有分布,但是同一种类的物质基本分布在同一象限,并聚在一起。其中,萜烯类物质主要分布在第 4 象限,如

反-3-二十烯、 α -蒎烯、(顺,反)- α -法尼烯、石竹烯、芳樟醇等;醛类物质在第 1 和第 2 象限均有分布,如 3-己烯醛、苯甲醛、庚醛、辛醛和十二醛分布在第 2 象限,壬醛、癸醛和十一醛分布在第 1 象限;醇类物质在 4 个象限均有分布,其中顺-3-己烯-1-醇分布在第 2 象限;烷烃类主要集中分布于第 1 象限;酯类物质主要集中分布于第 1 和第 2 象限,如水杨酸甲酯、乙酸叶醇酯分别分布在第 1 和第 2 象限;酮类物质如香叶基丙酮、植酮,分别分布在第 3 和第 1 象限。



数字编码 1—58 对应的化合物见表 1

The coding of 1—58 in this figure is the same as Table 1

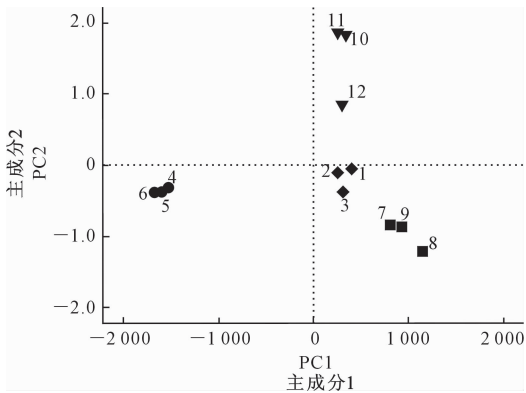
图 2 新疆野苹果植株挥发物在前 2 个主成分上的二维分布散点图

Fig. 2 Scatter plot of different volatiles of *Malus sieversii* trees based on the first two principal components

从图 3 可以看出,健康处理和茉莉酸甲酯处理植株处于二维分布图的右下方,且两者距离较近,未出现重叠,表明 2 组处理在挥发物的种类和含量上虽有共同特点,但也有一定区别。其他 2 组处理分别处于二维分布图的左下方和右上方,且距离较远,表明两者之间差异十分显著。除机械损伤处理外,其余 3 个处理均分布在二维分布图的右方,但是三者之间未出现重叠,且有一定的距离,表明 3 个处理之间都存在一定的差异。

2.3 不同处理新疆野苹果挥发物含量的层次聚类分析

4 个不同处理的新疆野苹果植株挥发物组分的层次聚类分析结果(图 4)显示,健康和茉莉酸甲酯处理植株首先聚为一类,然后这 2 个处理植株和虫害植株聚在一起,最后机械损伤与上述 3 个处理聚在一起。这表明前 2 种处理在挥发物的种类和含量方面最为相似,而其与后 2 种处理之间则存在较大差异。



1,2,3 代表健康植株;4,5,6 代表机械损伤植株;7,8,9 代表茉莉酸甲酯处理植株;10,11,12 代表苹果小吉丁虫危害植株
1,2, and 3 stand for control trees;4,5, and 6 stand for trees with mechanical damage;7,8, and 9 stand for trees under MeJA treatment; 10,11, and 12 stand for trees under *Agrilus mali* damage. The same below

图 3 4 种处理新疆野苹果植株在第 1、2 主成分上的二维分布散点图

Fig. 3 Scatter plot of four different treatments based on first two principal components

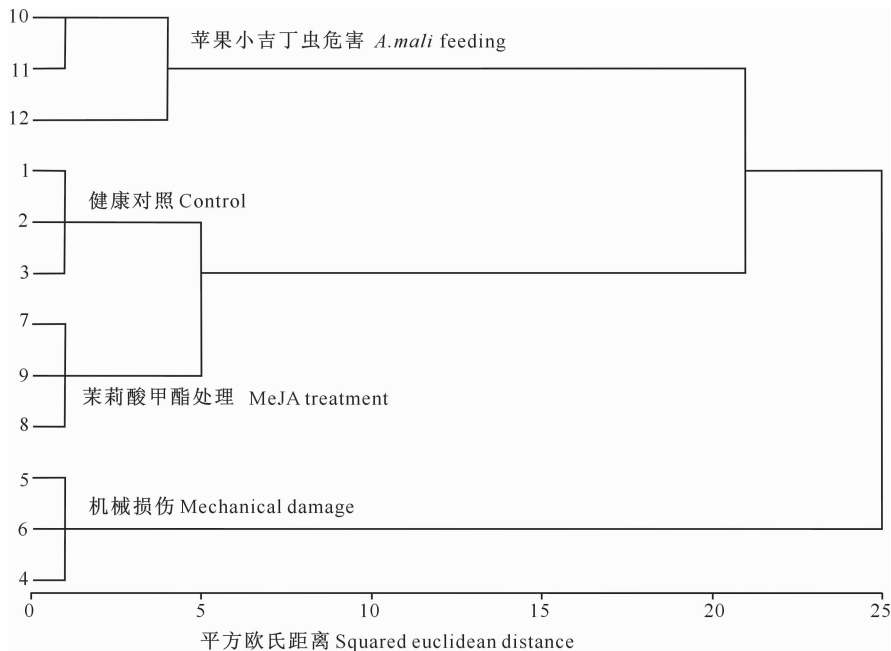


图 4 基于 4 种处理野苹果挥发物的层次聚类图

Fig. 4 Hierarchical cluster diagram of *Malus sieversii* trees of four different treatments

3 讨 论

外界条件诱导产生的寄主植物挥发物在害虫对寄主植物的定位、选择及植物间接防御过程中可能扮演着重要角色^[23-25]。本试验结果表明,野苹果受到机械损伤后的特有挥发物有 2-亚甲基-4-戊烯-1-醇和(顺,反)-2-丁烯酸-3-己烯酯。其中,前一种物质发生于受伤的植物叶片中,对光肩星天牛(*Anoplophora glabripennis* Motschulsky)有一定的驱避作用^[26-27];后一种物质(即丁烯酸己烯酯)能导致白蜡窄吉丁产生强烈的触角电位反应,并对该虫有一定吸引作用^[28]。茉莉酸甲酯诱导产生的特有挥发物左旋樟脑能对蛀干害虫如光肩星天牛、桑天牛(*Apriona germari* Hope)等的生长发育产生一定的负面影响^[29]。苹果小吉丁虫危害诱导产生的特有挥发物十一烷醇可以作为性信息素增效剂提高对梨小食心虫(*Grapholita molesta*)的诱捕效果^[30]。仅在茉莉酸甲酯和虫害处理中释放的挥发物邻伞花烃,对专性害虫咖啡潜叶蛾(*Leucoptera coffeella* Guérin-Méneville)在咖啡上的产卵具有一定的诱导效果^[31]。

除导致特有挥发物的产生和释放外,不同的诱导方式还能引起一些挥发物释放浓度的变化。例如,与健康对照植株释放的挥发物相比,受到机械损伤的植株释放的顺-3-己烯-1-醇的相对含量在数值上略有增加。有研究表明,该物质对苹果小吉丁虫

的同属害虫白蜡窄吉丁有较好的引诱效果^[32]。与健康对照植株释放的挥发物相比,乙酸叶醇酯和香叶基丙酮在茉莉酸甲酯处理植株中相对含量显著减少,而这 2 种物质对花椒窄吉丁(*Agilus zanthoxylum* Hou)和光肩星天牛分别有明显的驱避作用^[33-34]。与健康对照植株释放的挥发物相比,在受到机械损伤和苹果小吉丁虫危害的植株中, α -罗勒烯和 α -蒎烯的释放量有一定减少,但在茉莉酸甲酯处理植株中有一定增加。有研究表明, α -罗勒烯对光肩星天牛有显著的驱避作用^[35], α -蒎烯在一定浓度时对光肩星天牛具有明显的引诱作用^[36]。与健康对照植株释放的挥发物相比,芳樟醇和(顺,反)- α -法尼烯在机械损伤处理植株中的相对含量有所减少,在茉莉酸甲酯处理和苹果小吉丁虫危害植株中的相对含量有所增加。有证据显示,这 2 种物质对白蜡窄吉丁和苹果蠹蛾(*Cydia pomonella* L.)分别有强烈的引诱效果^[22,37]。与健康对照植株释放的挥发物相比,其他 3 个处理收集到的新物质石竹烯不仅能引起花椒窄吉丁强烈的触角电位反应,而且在一定浓度时对花椒窄吉丁有驱避作用^[33]。与机械损伤处理植株释放的挥发物相比,壬醛在茉莉酸甲酯处理植株和苹果小吉丁虫危害植株中的相对含量有所增加。有研究表明,壬醛在一定浓度时对松墨天牛(*Monochamus alternatus* Hope)具有明显的引诱效果^[38]。因此,不同处理诱导下上述特有挥发物或相对含量发生明显改变的挥发物,在苹果小吉

丁虫的寄主植物定位、产卵地点选择或求偶等行为中可能发挥重要作用。这些物质的具体化学通讯功能需要在今后的行为生测、触角电位及相关田间试验中进行深入探讨,这将为利用这些物质研发针对苹果小吉丁虫的高效引诱剂或驱避剂以及绿色治理策略奠定基础。

另外,与健康对照植株释放的挥发物相比,水杨酸甲酯和芳樟醇在受到机械损伤后相对含量有所减少,但在受到苹果小吉丁虫危害后相对含量有所上升。有研究表明,前一种物质对二点叶螨(*Tetranychus urticae* Koch)的捕食性天敌智利小植绥螨(*Phytoseiulus persimilis* Athias-Henriot)具有明显的吸引作用^[39],而后一种物质对水稻害虫褐飞虱(*Nilaparvata lugens* Stal)的寄生性天敌稻虱缨小蜂(*Anagrus nilaparvatae* Pang & Wang)具有强烈的引诱作用^[40]。此外,与健康对照植株释放的挥发物相比,一些烷烃如十五烷和十七烷等在机械损伤植株中含量显著减少。有研究表明,十五烷对捕食性天敌拟环纹豹蛛(*Pardosa pseudoannulata*)有引诱效果^[41]。因此,上述物质可能在野苹果树的间接防御中发挥一定作用,而机械损伤处理比茉莉酸甲酯或虫害处理可能更容易诱导野苹果树释放能吸引自然天敌的挥发物。如果这些物质在野苹果树一苹果小吉丁虫—自然天敌系统中的功能得到证实,机械损伤处理这种简单易行的办法便可能用于增强野果林中苹果小吉丁虫的自然控制。

4 结 论

本研究通过顶空-固相微萃取技术,对不同处理条件下新疆野苹果植株挥发物的释放情况进行了GC-MS分析,结果表明,总共收集到不同种类的挥发物 58 种,其中 4 种不同处理共有的挥发物有 18 种,健康植株特有的挥发物共 3 种,机械损伤植株和茉莉酸甲酯处理植株特有的挥发物均为 5 种,虫害植株特有的挥发物共 4 种。与健康对照植株释放的挥发物相比,其他 3 个处理总共收集到了 21 种新物质。机械损伤、茉莉酸甲酯处理及虫害处理等外界因素会导致新疆野苹果树体内挥发性化合物组分在含量和物质种类上发生明显改变,尤其是醇类、酯类和萜烯类物质的变化。例如顺-3-己烯-1-醇在健康对照植株体内含量较高,但是在茉莉酸甲酯和虫害处理植株体内却未检测到。此外,与健康对照植株释放的挥发物相比,茉莉酸甲酯处理和小吉丁危害植株上 3-己烯醛和乙酸叶醇酯等物质含量显著减

少,(顺,反)- α -法尼烯和芳樟醇等物质含量有所增加,这些物质与新疆野苹果树一苹果小吉丁虫—天敌的三级营养关系和植物诱导化学防御等可能有紧密联系。通过因子分析法提取的 3 个主成分总共解释了处理之间挥发物变化的 81.11%。通过系统聚类分析,可以将 4 种不同处理分为不同的类别,茉莉酸甲酯处理植株与健康植株聚为一类,机械损伤植株和虫害植株各自归为一类。聚类结果与 4 种不同处理间的主成分二维分布图结果一致,2 种不同的数据分析方法可以从不同的角度对原始数据进行更深层次的剖析,为开发更加有效的植物源引诱剂和驱避剂、更好地防治此类害虫提供了相关理论及科学依据。

[参考文献]

- [1] Herms D A, McCullough D G. Emerald ash borer invasion of North America: history, biology, ecology, impacts and management [J]. Annual Review of Entomology, 2014, 59(1): 13-30.
- [2] 崔晓宁, 刘德广, 刘爱华. 苹果小吉丁虫综合防控研究进展 [J]. 植物保护, 2015, 41(2): 16-23.
Cui X N, Liu D G, Liu A H. Research progress in integrated management of *Agrilus mali* [J]. Plant Protection, 2015, 41(2): 16-23.
- [3] 陈 军, 湛玉荣. 苹果小吉丁虫的预防措施及防治方法 [J]. 新疆农业科学, 2007, 44(S2): 186-187.
Chen J, Zhan Y R. Prevention measures and control methods of *Agrilus mali* (Coleoptera: Buprestidae) [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2007, 44(S2): 186-187.
- [4] 崔晓宁, 伊志豪, 王 明, 等. 苹果小吉丁成虫补充营养的取食选择性及相关植物挥发物分析 [J]. 林业科学, 2016, 52(11): 96-106.
Cui X N, Yi Z H, Wang M, et al. Maturation feeding preference of adult *Agrilus mali* and related host plant leaf volatiles [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2016, 52(11): 96-106.
- [5] Crook D J, Khirman A, Francese J A, et al. Development of a host-based semiochemical lure for trapping emerald ash borer *Agrilus planipennis* (Coleoptera: Buprestidae) [J]. Environmental Entomology, 2008, 37(2): 356-365.
- [6] 孙晓玲, 高 宇, 陈宗懋. 虫害诱导植物挥发物(HIPVs)对植物性昆虫的行为调控 [J]. 应用昆虫学报, 2012, 49(6): 1413-1422.
Sun X L, Gao Y, Chen Z M. Behavior regulation of herbivores by herbivores induced plant volatiles (HIPVs) [J]. Chinese Journal of Applied Entomology, 2012, 49(6): 1413-1422.
- [7] 程 彬, 付晓霞, 韩 启, 等. 虫害诱导的家榆挥发物对榆紫叶甲寄主选择行为的影响 [J]. 林业科学, 2010, 46(10): 76-82.
Cheng B, Fu X X, Han Q, et al. Effects of herbivore-induced *Ulmus pumila* volatiles on the host selection process of *Ambr-ostoma quadriimpressum* [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46

- (10):76-82.
- [8] Rigsby C M, Showalter D N, Herms D A, et al. Physiological responses of emerald ash borer larvae to feeding on different ash species reveal putative resistance mechanisms and insect counter-adaptations [J]. *Journal of Insect Physiology*, 2015, 78:47-54.
- [9] Villari C, Herma D A, Whitehill J G A, et al. Progress and gaps in understanding mechanisms of ash tree resistance to emerald ashborer, a model for wood-boring insects that kill angiosperms [J]. *New Phytologist*, 2016, 209(1):63-79.
- [10] 田 军, 顾 伟, 马 玲, 等. 白蜡吉丁柄腹茧蜂雌蜂对不同气味的嗅觉反应研究 [J]. *森林工程*, 2009, 25(5):15-18.
Tian J, Gu W, Ma L, et al. Research on olfactory response of *Spathius agrili* to different odor sources [J]. *Forest Engineering*, 2009, 25(5):15-18.
- [11] Bolter C J, Dicke M, van Loon J J A, et al. Attraction of Colorado potato beetle to herbivore-damaged plants during herbivory and after its termination [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1997, 23(4):1003-1023.
- [12] Sun X L, Wang G C, Cai X M, et al. The tea weevil, *Myloecerus aurolineatus*, is attracted to volatiles induced by conspecifics [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2010, 36(4):388-395.
- [13] McCullough D G, Poland T M, Anulewicz A C, et al. Emerald ash borer (Coleoptera: Buprestidae) attraction to stressed or baited ash trees [J]. *Environmental Entomology*, 2009, 38(6):1668-1679.
- [14] Duan J J, Larson K, Watt T, et al. Effects of host plant and larval density on intraspecific competition in larvae of the emerald ash borer (Coleoptera: Buprestidae) [J]. *Environmental Entomology*, 2013, 42(6):1193-1200.
- [15] Greelman R A, Tierney M L, Mullet J E. Jasmonic acid/methyl jasmonate accumulate in wounded soybean hypocotyls and modulate wound gene expression [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 1992, 89(11):4938-4941.
- [16] 张艳峰, 谢映平, 薛皎亮, 等. 茉莉酸甲酯和日本龟蜡蚧诱导柿树挥发物对红点唇瓢虫的吸引 [J]. *林业科学*, 2009, 45(1):90-96.
Zhang Y F, Xie Y P, Xue J L, et al. Attraction to the lady beetle by the volatiles of persimmon trees induced with methyl jasmonate and Japanese wax scale attacking [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 45(1):90-96.
- [17] Whitehill J G A, Rigsby C M, Cipollini D, et al. Decreased emergence of emerald ash borer from ash treated with methyl jasmonate is associated with induction of general defense traits and the toxic phenolic compound verbascoside [J]. *Oecologia*, 2014, 176(4):1047-1059.
- [18] 王 薇, 李继泉, 王树香, 等. 茉莉酸诱导桑枝对桑天牛卵啮小蜂的引诱作用及桑枝挥发物组分分析 [J]. *昆虫学报*, 2016, 59(9):997-1003.
Wang W, Li J Q, Wang S X, et al. Attractiveness of jasmonic acid-treated *Morus alba* branches to *Aprostocetus prolixus* (Hymenoptera: Eulophidae) and analysis of their volatile compounds [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2016, 59(9):997-1003.
- [19] 宋江峰, 李大婧, 刘春泉, 等. 甜糯玉米软罐头主要挥发性物质成分分析和聚类分析 [J]. *中国农业科学*, 2010, 43(10):2122-2131.
Song J F, Li D J, Liu C Q, et al. Principal components analysis and cluster analysis of flavor compositions in waxy corn soft can [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(10):2122-2131.
- [20] 顾赛麒, 王锡昌, 陶宁萍, 等. 基于固相微萃取-气-质联用法和电子鼻法检测锯缘青蟹挥发性风味物 [J]. *食品工业科学*, 2012, 33(14):140-156.
Gu S Q, Wang X C, Tao N P, et al. Study on detection of volatile flavor components in mangrove crab (*Scylla serrate*) by HS-SPME-GC-MS and E-Nose methods [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(14):140-156.
- [21] 李莹莹, 王小文, 孙 霞, 等. 中原牡丹品种主要花香挥发物的多元统计分析 [C]//张启翔. 中国观赏园艺研究进展. 北京: 中国林业出版社, 2015:92-101.
Li Y Y, Wang X W, Sun X, et al. Multivariate statistical analysis of main floral volatiles emitted from central plains tree peony (*Paeonia suffruticosa*) [C]//Zhang Q X. *Advances in Ornamental Horticulture of China*. Beijing: China Forestry Publishing House, 2015:92-101.
- [22] Rodriguez-Saona C, Poland T M, Miller J R, et al. Behavioral and electrophysiological responses of the emerald ash borer, *Agrilus planipennis*, to induced volatiles of manchurian ash, *Fraxinus mandshurica* [J]. *Chemoecology*, 2006, 16(2):75-86.
- [23] Chen Y, Whitehill J G A, Bonello P, et al. Differential response in foliar chemistry of three ash species to emerald ash borer adult feeding [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2011, 37(1):29-39.
- [24] Poland T M, Chen Y, Koch J, et al. Review of the emerald ash borer (Coleoptera: Buprestidae), life history, mating behaviours, host plant selection and host resistance [J]. *The Entomological Society of Canada*, 2015, 147(3):252-262.
- [25] 曹丽娟, 刘 强, 朱耿平, 等. 红缘天牛对沙棘 7 种挥发物的 EAG 和嗅觉行为反应 [J]. *天津师范大学学报(自然科学版)*, 2015, 35(3):84-88.
Cao L J, Liu Q, Zhu G P, et al. EAG and olfactory behavioral responses of *Asias halodendri* to seven volatiles from *Hippophae rhamnoides* [J]. *Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition)*, 2015, 35(3):84-88.
- [26] Fisher A J, Grimes H D, Fall R. The biochemical origin of pentenol emissions from wounded leaves [J]. *Phytochemistry*, 2003, 62(2):159-163.
- [27] 张凤娟, 金幼菊, 陈华君, 等. 光肩星天牛对 4 种不同槭树科寄主植物的选择机制 [J]. *生态学报*, 2006, 26(3):870-877.
Zhang F J, Jin Y J, Chen H J, et al. The selectivity mechanism of *Anoplophora glabripennis* on four different species of maples [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3):870-877.
- [28] Groot P, Grant G G, Poland T M, et al. Electrophysiological

- response and attraction of emerald ash borer to green leaf volatiles (GLVs) emitted by host foliage [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2008, 34(9): 1170-1179.
- [29] 薛 勇. 樟脑丸熏蒸法防治果树蛀干害虫 [J]. *吉林农业*, 1996, 12(9): 16-17.
- Xue Y. Fumigation of camphor ball to prevent decayed stem pests of fruiter [J]. *Agriculture of Jilin*, 1996, 12(9): 16-17.
- [30] 于海利. 梨小食心虫性信息素增效剂的研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- Yu H L. Studies on synerism to the sex pheromone of the oriental fruit moth, *Grapholita molesta* (Busck) (Lepidoptera: Tortricidae) [D]. Beijing: China Agricultural University, 2015.
- [31] Magalhaes S T V, Guedes R N C, Lima E R, et al. Coffee leaf volatiles and egg laying by the coffee leaf miner *Leucoptera coffeella* [J]. *Crop Protection*, 2008, 27(6): 1038-1041.
- [32] Grant G G, Ryall K L, Lyons D B, et al. Differential response of male and female emerald ash borers (Col., Buprestidae) to (Z)-3-hexenol and manuka oil [J]. *Journal of Applied Entomology*, 2010, 134(1): 26-33.
- [33] 袁丽芳. 花椒窄吉丁对寄主挥发物化学感受机制的初步研究 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- Yuan L F. The preliminary study on mechanism of odor perception in *Agrilus zanthoxylumi* to volatiles from *Zanthoxylum bungeanum* [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2016.
- [34] 李继泉, 樊 慧, 金幼菊, 等. 光肩星天牛取食后复叶挥发物的释放机制 [J]. *北京林业大学学报*, 2002, 24(5/6): 170-174.
- Li J Q, Fan H, Jin Y J, et al. Emission mechanism of volatile compounds from ashleaf maple feeding-damaged by *Anoplophora glabripennis* (Motsch.) [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, 24(5/6): 170-174.
- [35] Singh G, Singh O P, de Lampasona M P, et al. Studies on essential oils. Part 35: chemical and biocidal investigations on *Tagetes erecta* leaf volatile oil [J]. *Flavour and Fragrance Journal*, 2003, 18(1): 62-65.
- [36] 范丽清, 严善春, 孙宗华, 等. 光肩星天牛对植物源挥发物的触角电位和行为反应 [J]. *生态学杂志*, 2013, 32(1): 142-148.
- Fan L Q, Yan S C, Sun Z H, et al. EAG and behavioral responses of Asian longhorn beetle *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae) to plant volatiles [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(1): 142-148.
- [37] 李 红. 苹果果皮中 α -法尼烯和类黄酮的提取及其抗氧化能力研究 [D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2004.
- Li H. Isolation and antioxidant capacity of α -farnesene and total flavonoids from apple skins [D]. Tai'an, Shandong: Shandong Agricultural University, 2004.
- [38] Ikeda T, Oda K, Yamane A, et al. Volatiles from pine logs as the attractant for the Japanese pine sawyer, *Monochamus alternatus* Hope (Coleoptera: Cerambycidae) [J]. *Journal of the Japanese Forestry Society*, 1980, 62(4): 150-152.
- [39] Dicke M, Sabelis M W, Takabayashi J, et al. Plant strategies of manipulating predator-prey interactions through allelochemicals: prospects for application in pest control [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1990, 16(11): 3091-3118.
- [40] Cheng J A, Lou Y G, Ping X F, et al. Isolation and identification of herbivore-induced rice synomone used by the egg parasitoid, *Anagrus nilaparvatae* Pang et Wang, in search for a host [C]//Proceedings of first Asia-Pacific conference on chemical ecology. Shanghai: Shanghai Insititute of Entomology, 1999: 127-128.
- [41] 汪 波, 黄若仪, 谭昭君, 等. 正十五烷对狼蛛嗅觉定位的影响 [J]. *江苏农业学报*, 2015, 31(3): 538-542.
- Wang B, Huang R Y, Tan Z J, et al. Effect of n-pentadecane on wolf spider's olfactory orientation [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2015, 31(3): 538-542.