

不同温度、光照对虫害紫茎泽兰挥发物释放的影响

任 琴^{1,2}, 谢明惠¹, 张青文^{1,*}, 齐 钢¹, 刘小侠¹

(1. 中国农业大学, 北京 100193; 2. 内蒙古集宁师范学院, 集宁 012000)

摘要:用不同温度和光照处理对照和棉蚜侵害的盆栽紫茎泽兰植株后,通过 TCT-GC/MS 分析了叶片挥发物的成分及相对含量。结果表明:温度与光照均不影响对照和虫害紫茎泽兰挥发物的种类,但影响其挥发物的相对含量。当光照强度达到 300—400 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,虫害紫茎泽兰挥发物中,多数单萜的相对含量显著高于对照,而倍半萜含量显著低于对照;绿叶挥发物相对含量与其对照相比差异不显著。当外界温度在 15—30℃ 时,虫害紫茎泽兰挥发物中绿叶气体如己醛、2-己烯醛和多数单萜化合物的相对含量随温度升高而显著增加,而倍半萜含量却低于对照。说明适宜的温度和光照条件影响挥发物化学指纹图的构成,进而可能影响到蚜虫的取食。

关键词:紫茎泽兰; 温度; 光照; 挥发性化学物质

Effect on volatile compounds from damaged *Eupatorium adenophorum* by different temperature and light

REN Qin^{1,2}, XIE Minghui¹, ZHANG Qingwen^{1,*}, QI Gang¹, LIU Xiaoxia¹

1 China Agricultural University, Beijing 100193, China

2 Inner Mongolia Jining Normal College, Jining 01200, China

Abstract: Using TCT-GC/MS technique, the comparative analysis of composition and relative percentage of volatile organic compounds in leaves of *Eupatorium adenophorum* infested with and without cotton aphids under control conditions at different temperatures and lights were performed. The Results showed that, composition of volatile compounds released from both the control and infested leaves were not affected, but the relative percentage of those were changed under the different temperatures and lights. When the light intensity reached 300—400 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, the relative percentage of most monoterpenes were more abundant in infested leaves than in control leaves, while the relative percentage of sesquiterpene decreased significantly. Furthermore, the relative contents of green leaf volatiles, such as Hexanal, 2-Hexenal and most monoterpenes, in the infested leaves of *E. adenophorum* significantly increased as temperature went up between 15℃ and 30℃, but sesquiterpene decreased. These data may suggest that suitable temperature and light affected the chemical fingerprint of *E. adenophorum*, and hence influencing the aphids feeding.

Key Words: *Eupatorium adenophorum*; temperature; light; volatile compounds

紫茎泽兰 (*Eupatorium adenophorum* Spreng) 是一种世界入侵性恶性杂草,属菊科泽兰属多年生草本植物或亚灌木,大约在 20 世纪 40 年代由中缅边境传入我国云南省,现已在我国的云南、贵州、四川、广西、西藏、台湾等 4 省 2 区广泛分布和危害^[1-2]。仅云南省的农业因紫茎泽兰灾害引起的损失每年已高达 7 亿多元,牧草每年损失 7000 万元,间接损失不可计数,给社会经济和生态平衡带来巨大损失^[3]。有关紫茎泽兰的研究已有一些报道,主要集中于其分布范围及可能扩散的区域、侵入扩张机理以及防除方法^[4-6]。

基金项目:国家 973 资助项目(2002CB111407);博士后基金资助项目(20070420434)

收稿日期:2009-04-01; **修订日期:**2009-10-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangqingwen@263.net

已有的研究表明:挥发物在植食性昆虫的寄主定位、交配、寻找合适的产卵场所、取食等行为调控中起重要作用。研究发现,温室中的紫茎泽兰存在着一定数量的棉蚜种群,但田间的紫茎泽兰很少有昆虫取食。可能由于紫茎泽兰生境的改变,如其中温度、光照等的影响,而使其挥发物的种类或数量发生变化,从而利于引诱棉蚜。国内外紫茎泽兰化学组分的研究仅限于对其活性成分的提取分离,如 Bohlmann 等^[7]从紫茎泽兰中分离得到 4 种化合物和 6 种倍半萜烯;Baruah 等^[8]研究表明紫茎泽兰的化感物质为倍半萜烯化合物;Palá-Paúl 等^[9]用 GC/MS 对生长在加那利群岛的紫茎泽兰地上部分挥发油进行研究,结果显示所测化合物中倍半萜组分明显高于单萜。丁智慧等^[10]首次从泽兰属植物中分离得到克拉维醇,该化合物对小菜粉蝶幼虫(*Pieris rapae*)具有一定的拒食活性;对紫茎泽兰地上部分化感物质进行研究,发现 11 种萜烯类化合物,包括 2 种单萜和 9 种倍半萜^[11],其中化感性强的物质是 9-酮-泽兰酮^[12]。但有关光照及温度等外界条件对虫害紫茎泽兰挥发物释放的影响未见报道。

本试验研究了不同温度和光照等外界条件对紫茎泽兰挥发物释放的影响,旨在找出最适温度和光照强度对紫茎泽兰挥发物释放的影响,为进一步揭示挥发物在紫茎泽兰-棉蚜中的相互作用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

紫茎泽兰种子采集于云南昆明,种植在直径 25 cm、且装有蛭石和草炭混合物的花盆中。植物在温室条件下生长,蚜虫感染植株为温室中自然感染后罩笼备用。棉蚜由中国农业大学昆虫毒理室提供。

1.1.1 不同温度对紫茎泽兰挥发物释放的影响

选取长势一致、具有 10 片叶子的植株 15 盆,将其分为 5 组,每组 3 盆,分别移至 5 个人工气候箱中,箱内温度分别为 15℃、20℃、25℃、30℃、35℃,相对湿度均为 $(60 \pm 2)\%$,光照条件为 $250\text{—}350\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (L:D=13:11)。生长一周后将其取出作为对照。另选与对照生长一致的蚜虫感染植株 15 盆,按照上述方法进行处理后作为受害株。将虫害植株上的蚜虫扫掉后,采用动态顶空采集法收集其挥发物。收集挥发物所用吸附管长 16cm,内径 3mm(Chrompack 公司),内装吸附剂为 Tenax-GR(Sigma 公司)。

1.1.2 不同光照条件下紫茎泽兰挥发物的释放

按照上面的方法,分别选取对照和虫害植株各 9 盆,用 3 种光照强度 $300\text{—}400\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $800\text{—}1000\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $1500\text{—}2000\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 分别对虫害和其对照植株照射 30min 后,去掉照射光源,收集挥发物。期间温度条件为 $(25 \pm 5)^\circ\text{C}$ 。各处理重复 3 次。

将收集挥发物的样品管放入干燥器中,以备室内测定。

1.2 挥发物的测定

采用 TCT-GC/MS 进行测定。

1.2.1 TCT-GC/MS 型号

CP-4010 PTL/TCT(CHROMPACK 公司) TRACE TM GC 2000(CE INSTRUMENT 公司) VOYAGER MASS (FINNIGAN 公司)。

1.2.2 仪器的工作条件

TCT 的主要条件 System Pressure:20Kpa, Rod temperature:250℃(10min), Trap inject:260℃。GC 的工作条件:色谱柱:DB-5 Low Bleed/MS 柱($60\text{m} \times 0.32\text{mm} \times 0.5\mu\text{m}$),通过液氮脱附进样,He 载气。程序升温:40℃(3min)—6℃/min—270℃(5min), Post run 280℃(5min)。

MS 的工作条件 Ionization Mode:EI; E-energy:70ev; Mass range:29—350 amu; L/F: 250℃, Src:200℃, Emission Current:150uA,全扫描,每次扫描所用时间 0.4s,质谱扫描范围 m/z19—435。

1.2.3 挥发性物质的鉴定

采用 Xcalibur 1.2 版本软件, NIST 98 谱图库兼顾色谱保留时间进行紫茎泽兰挥发物成分的鉴定,并通过标样进行验证。化合物(—)-Myrtenyl acetate 和 1,5-heptadiene, 6-methyl-2-(4-menthyl-3-cyclohexen-1-yl)只

通过谱图库中 RSI 和可能性进行鉴定,其余挥发物均通过标样验证。各种标样的纯度 $\geq 97\%$,购买于 Sigma-Aldrich Chem. Co。通过面积归一化法以各类挥发物的相对含量定量。

1.3 挥发物的统计分析

通过 SPSS10.0 统计软件对各处理间挥发物的相对含量进行方差分析($P < 0.05$)。

2 结果及分析

2.1 不同光照强度对虫害紫茎泽兰挥发物释放的影响

不同光照强度对健康对照及虫害紫茎泽兰主要挥发物的释放影响如表 1 所示。结果表明:不同光照强度对紫茎泽兰挥发物种类没有影响,这些主要组分包括绿叶气体、萜烯类化合物(单萜和倍半萜)及其它含氧化合物。其中萜烯类化合物是种类和相对含量最多的一类,蒾烯、2-蒾烯、 α -水芹烯和 ρ -散花烯是其主要组分,它们在正常植株中的相对含量约占挥发物总量的 50%。当光照强度在 $300\text{--}400\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,虫害紫茎泽兰挥发物中,除柠檬烯含量显著低于对照外, α -蒾烯、蒾烯、 β -蒾烯、2-蒾烯等单萜的相对含量均显著高于对照($P < 0.01$),而含氧化合物乙酸冰片酯、(–)-Myrtenyl acetate 和倍半萜烯如 2-降蒾烯, 2, 6-二甲基-6-(4-甲基-3-戊烯)、石竹烯、长叶蒾烯、异喇叭茶烯、法尼烯、大香叶烯 D、1,5-heptadiene, 6-methyl-2-(4-menthyl-3-cyclohexen-1-yl) 含量显著低于对照 ($P < 0.01$)。绿叶气体己醛和 (E)-己-3-烯醇尽管含量高于对照,但方差分析结果显示,它们与对照差异不显著($P > 0.05$)。这一结果与自然光照下虫害紫茎泽兰挥发物的变化趋势相一致。随着光照强度的增加,虫害绿叶气体 (E)-己-3-烯醇含量显著增加。当光照强度达到 $800\text{--}1000\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,单萜 2-蒾烯相对含量在虫害叶中显著降低,而 ρ -散花烯含量则明显升高。虫害紫茎泽兰叶中倍半萜含量随光照强度的增加变化较小,其对照与虫害间差异不显著。

表 1 不同光照强度对虫害紫茎泽兰挥发物释放的影响

Table 1 Effect on relative percentage of volatile compounds from *E. adenophorum* under different light intensity

保留时间 RT	不同光照强度 Different light intensity	$300\text{--}400\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$		$800\text{--}1000\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$		$1500\text{--}2000\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	
	化合物 Compounds	对照/% Control	虫害/% Feeding	对照/% Control	虫害/% Feeding	对照/% Control	虫害/% Feeding
13.31	己醛	0.00 $\pm$ 0.00	0.01 $\pm$ 0.01	0.00 $\pm$ 0.00	0.02 $\pm$ 0.01	0.02 $\pm$ 0.01	0.01 $\pm$ 0.01
16.6	(E)-己-3-烯醇 (E)-Hex-3-en-1-ol	0.00 $\pm$ 0.00	0.02 $\pm$ 0.01	0.00 $\pm$ 0.00	0.08 $\pm$ 0.04 *	0.00 $\pm$ 0.00	0.09 $\pm$ 0.04 *
19.16	α -蒾烯	0.00 $\pm$ 0.00	0.03 $\pm$ 0.02 **	0.06 $\pm$ 0.02	0.05 $\pm$ 0.01	0.06 $\pm$ 0.04	0.06 $\pm$ 0.02
19.85	蒾烯	4.35 $\pm$ 2.33	20.52 $\pm$ 5.92 **	1.48 $\pm$ 0.33	13.11 $\pm$ 7.69	11.74 $\pm$ 1.67	13.95 $\pm$ 6.59
20.77	β -蒾烯	0.00 $\pm$ 0.00	0.05 $\pm$ 0.01 **	0.06 $\pm$ 0.01	0.05 $\pm$ 0.01	0.04 $\pm$ 0.02	0.07 $\pm$ 0.03
21.42	2-蒾烯	26.23 $\pm$ 3.21	53.02 $\pm$ 6.97 **	60.98 $\pm$ 7.58	46.18 $\pm$ 3.34 *	38.85 $\pm$ 1.65	50.79 $\pm$ 2.75 **
21.62	α -水芹烯	8.77 $\pm$ 1.62	8.15 $\pm$ 1.38	15.99 $\pm$ 4.32	7.41 $\pm$ 5.19	22.73 $\pm$ 5.96	14.95 $\pm$ 1.99
22.22	ρ -散花烯	18.63 $\pm$ 5.49	16.54 $\pm$ 7.15	8.55 $\pm$ 1.86	22.81 $\pm$ 2.38 **	46.45 $\pm$ 7.73	26.51 $\pm$ 3.84 *
22.25	柠檬烯	0.91 $\pm$ 0.54	0.23 $\pm$ 0.01 **	0.44 $\pm$ 0.14	0.30 $\pm$ 0.08	0.99 $\pm$ 0.37	0.57 $\pm$ 0.36
27.1	冰片	0.00 $\pm$ 0.00	0.02 $\pm$ 0.01	0.00 $\pm$ 0.00	0.04 $\pm$ 0.02 *	0.01 $\pm$ 0.00	0.03 $\pm$ 0.02
29.9	乙酸冰片酯	5.13 $\pm$ 1.25	0.12 $\pm$ 0.13 **	0.88 $\pm$ 0.21	0.14 $\pm$ 0.03 **	0.67 $\pm$ 0.09	0.34 $\pm$ 0.01 **
33.46	2-降蒾烯, 2,6-二甲基-6-(4-甲基-3-戊烯)	4.86 $\pm$ 2.11	0.04 $\pm$ 0.02 **	0.17 $\pm$ 0.03	0.11 $\pm$ 0.05	0.22 $\pm$ 0.06	0.12 $\pm$ 0.06
33.55	石竹烯	4.33 $\pm$ 1.15	0.34 $\pm$ 0.04 **	0.14 $\pm$ 0.03	0.74 $\pm$ 0.11 **	0.24 $\pm$ 0.09	0.28 $\pm$ 0.08
34.35	长叶蒾烯	3.90 $\pm$ 1.22	0.05 $\pm$ 0.01 **	0.18 $\pm$ 0.07	0.21 $\pm$ 0.04	0.12 $\pm$ 0.03	0.11 $\pm$ 0.01
34.55	异喇叭茶烯	3.59 $\pm$ 1.25	0.10 $\pm$ 0.02 **	0.13 $\pm$ 0.04	0.27 $\pm$ 0.01 *	0.08 $\pm$ 0.03	0.10 $\pm$ 0.03
34.68	法尼烯	1.94 $\pm$ 0.56	0.04 $\pm$ 0.01 **	0.09 $\pm$ 0.04	0.18 $\pm$ 0.02 *	0.07 $\pm$ 0.01	0.07 $\pm$ 0.01
34.86	大香叶烯 D	2.28 $\pm$ 1.62	0.03 $\pm$ 0.01 **	0.11 $\pm$ 0.06	0.11 $\pm$ 0.06	0.05 $\pm$ 0.02	0.05 $\pm$ 0.01
34.98	1,5-heptadiene, 6-methyl-2-(4-menthyl-3-cyclohexen-1-yl)°	2.23 $\pm$ 0.09	0.08 $\pm$ 0.01 **	0.13 $\pm$ 0.05	0.43 $\pm$ 0.09 **	0.12 $\pm$ 0.01	0.13 $\pm$ 0.04
35.44	(–)-Myrtenyl acetate°	10.88 $\pm$ 1.73	0.29 $\pm$ 0.13 **	0.40 $\pm$ 0.10	0.62 $\pm$ 0.22	0.18 $\pm$ 0.05	0.15 $\pm$ 0.05

注:表中挥发物均为 TIC 强度在 E4 以上,平均值($\pm$ 标准差)为 3 次重复的均值;* 和 * * 分别表示对照与处理间差异显著($P < 0.05$)和差异极其显著($P < 0.01$)。°标注的两种化合物通过谱图库 RSI 和可能性进行鉴定

当温度一定时,植物挥发物的释放率和碳同化率随光强的变化趋势相同。说明用于合成挥发物的碳源主要来自光合作用所固定的碳,在 $40\text{--}44^\circ\text{C}$ 和 $800\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光照条件下,栎属植物的异戊二烯释放率达到最大值,而用于合成异戊二烯损失掉的碳只相当于光合作用所固定的 $0.1\%\text{--}0.2\%$ [13]。挥发物的释放主要通过叶中气孔完成。在一定范围内,随光照强度的增强,气孔的开度加大,挥发物的释放量增大。超过一定光照强度后,气孔开度减小,挥发物的释放量降低。较强的光照可以激活催化亚麻酸氧化成醛的脂肪酸氧化酶,这也是绿叶挥发物释放量增加的原因之一。

2.2 温度对虫害紫茎泽兰挥发物释放的影响

结果表明:不同温度对紫茎泽兰挥发物释放的影响与光照相同,它们对挥发物种类没有影响,但对其相对含量有显著的影响。与对照相比,虫害紫茎泽兰挥发物的相对含量在 15°C 和 35°C 条件下无明显的规律性。但在 $20\text{--}30^\circ\text{C}$ 条件下,随着温度的升高,虫害紫茎泽兰挥发物的变化出现明显的规律性,绿叶气体己醛、2-己烯醛的相对含量明显升高(图1);除柠檬烯外,多数单萜化合物的相对含量也明显升高。其中 α -水芹烯和 ρ -散花烯在 20°C 升至最高, α -蒎烯在 30°C 达到最高(图2)。 35°C 时,挥发物的释放量仍然比较高,但其规律性不明显。

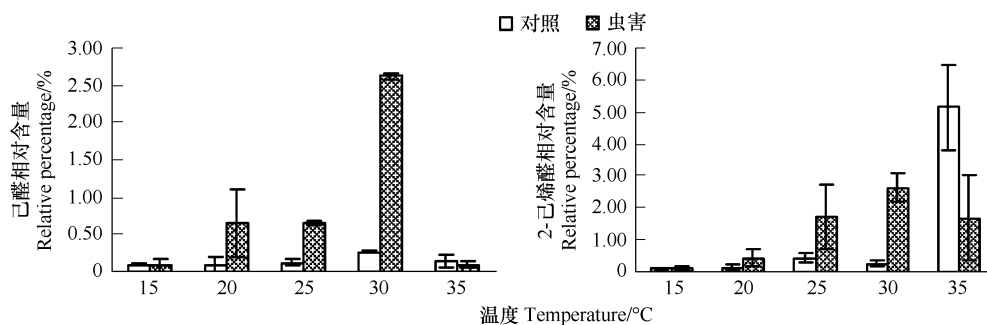


图1 不同温度条件下紫茎泽兰绿叶挥发物的相对含量

Fig.1 Relative percentage of green leaf volatiles from *E. adenophorum* under different temperatures

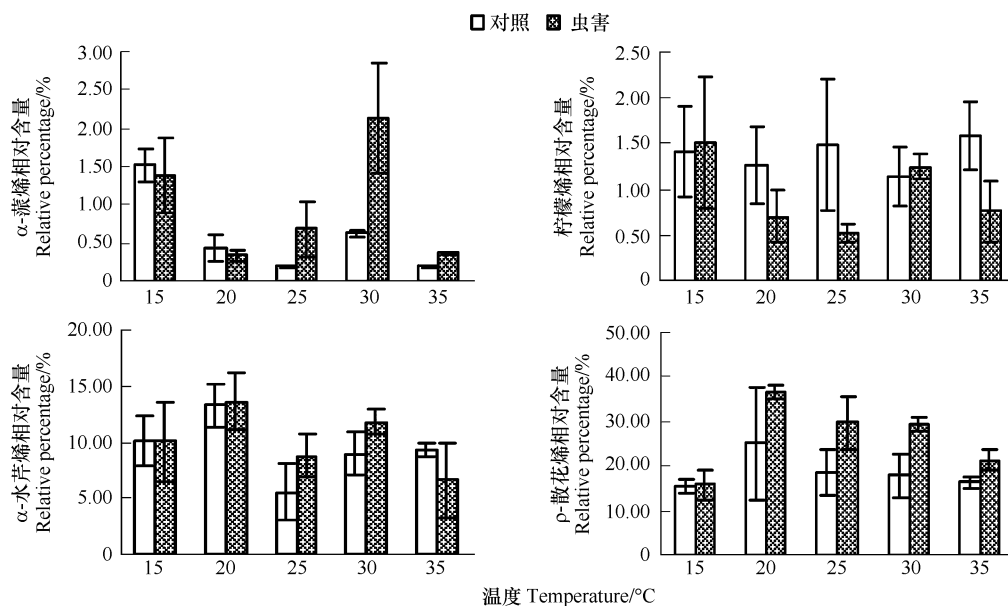


图2 不同温度条件下紫茎泽兰单萜的相对含量

Fig.2 Relative percentage of monoterpenes from *E. adenophorum* under different temperatures

图3为不同温度条件下紫茎泽兰挥发物中倍半萜相对含量的变化。结果表明,虫害紫茎泽兰倍半萜的变化与上述绿叶气体和多数单萜相反,除15℃时对照与虫害倍半萜的相对含量基本一致外,其余温度条件下均为对照显著高于虫害。对照植株在25℃时石竹烯、长叶蒎烯、大香叶烯D和法尼烯的相对含量均达到最高。这些化合物在所测温度范围内的变化趋势完全一致。

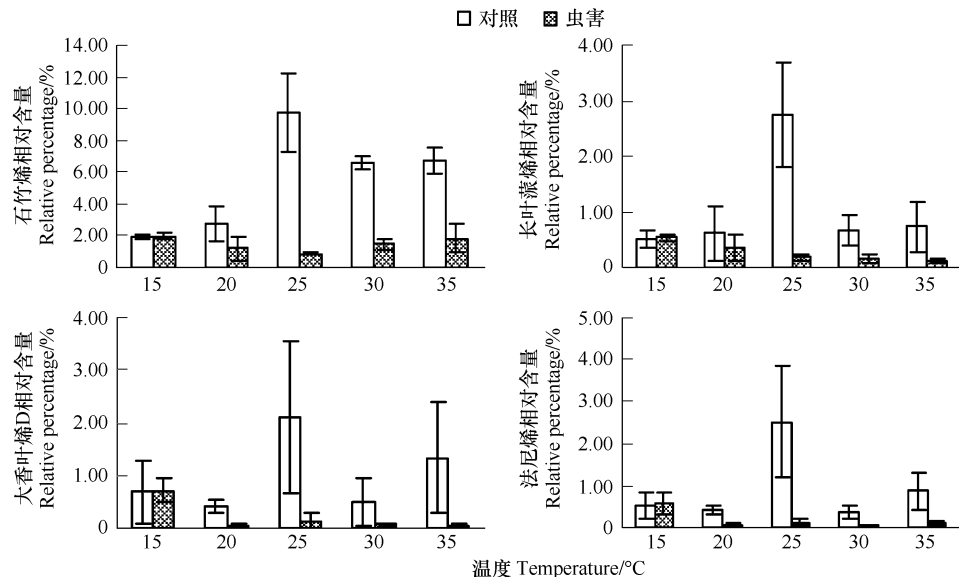


图3 不同温度条件下紫茎泽兰倍半萜的相对含量

Fig. 3 Relative percentage of sesquiterpenes from *E. adenophorum* under different temperatures

上述单萜和绿叶气体挥发物的变化均随温度的升高而加快,说明这种释放率对温度具有依赖性,可能主要是温度对酶影响的结果。Jakobsen 等^[14]研究发现20℃时白三叶(*Trifolium repens* L.)花的香气释放量比10℃高58%。葛藤(*Pueraria lobata*)在低于19℃时,萜烯类化合物的前体物质异戊二烯的释放量消失。当温度达到26℃,完全展开的叶片即被诱导产生异戊二烯,并且每升高10℃异戊二烯的释放量增加8倍^[15],这可能是由于高温增加了这些物质的挥发性或其生物合成过程所致。

3 结论与讨论

影响紫茎泽兰挥发物释放的最适温度和光照分别为20—30℃和300—400 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在一定温度范围内,虫害紫茎泽兰挥发物中绿叶气体和单萜的相对含量与温度呈正相关,但倍半萜含量的变化却与之相反;光照强度在300—400 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,虫害紫茎泽兰挥发物的变化与上述变化一致,随着光照强度的增加,虫害紫茎泽兰叶中倍半萜含量有较小幅度的增加,但与对照相比差异不显著。

已有的研究表明,温度是控制单萜释放速率的主要因素。一般随着温度的升高,单萜释放率增加。当温度超过某一范围后,其挥发物的释放量显著下降,这可能是叶片受到破坏和酶失活的结果。温度与苹果嫩枝中 α -蒎烯、蒎烯、石竹烯等挥发物的释放呈正相关^[16]。马尾松、湿地松挥发物的相对含量也随温度的升高而增加^[17],玉米在22—27℃时,挥发物的释放量最高。

在许多植物种类中,光照是影响萜烯类化合物合成速率的重要因素。光强度对挥发物的释放有一个急剧的影响,随着光强度的增加,其释放增强^[18]。除光照影响植物光合效率及气孔运动外,还可以通过改变叶绿体基质中 Mg^{2+} 浓度和pH值而激活异戊二烯合成酶,这种酶是萜烯类合成的限速酶,可以把二甲基丙烯基焦磷酸(DMAPP)转化成异戊二烯。在低光强条件下,光强较小程度的增加就会引起异戊二烯的大量合成。随着光强的不断增大,异戊二烯合成速率的增加幅度逐渐减小。

萜烯类化合物是紫茎泽兰挥发物的主要组分。尽管萜烯类的生物功能还没有完全清楚,但普遍认为它的释放是植物对高温的策略反应之一。高温下异戊二烯的释放有利于植物光合作用,它不仅能够提高光合作用

的热忍耐性,而且可以帮助光合器官在受到暂时高温(如 40℃)后得到恢复。其机制可能在于异戊二烯提高了高温下类囊体膜的稳定性^[19],或者淬灭了导致膜损伤的活性氧^[20]。本研究中,绿叶挥发物和单萜的变化结果与前人的研究相一致,均在一定范围内,随温度和光照条件的增加,其相对含量增加,但倍半萜含量的变化却与上述结果相反。

每种植物都有各自特定的化学指纹图,即植物往往通过散发不同种类、比例和数量的挥发物来构成某种植物的特定气味。植食性昆虫即通过对植物挥发物的不同配比及浓度的识别来做出行为选择。研究结果显示,温度和光照影响紫茎泽兰挥发物的相对含量,因而使其化学指纹图发生改变,进而影响棉蚜寻找寄主或产卵。业已表明,在单萜合成酶和倍半萜合成酶的催化下,牦牛儿基二磷酸(GPP; C₁₀)和法尼基二磷酸(FPP; C₁₅)分别形成单萜和倍半萜^[21]。它们在植物体内通过两条不同的途径形成。本研究中,倍半萜含量的不同可能是由于倍半萜合成酶活性降低所致,尚需进一步研究。

通过研究温度、光照等环境因子对植物挥发物的影响,可以预测各种植物挥发物的释放量,这对病虫害防治具有重要的理论和实践意义。

References:

- [1] Qiang S. The history and status of the study on crofton weed (*Eupatorium adenophorum* Spreng) a worst worldwide weed. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 1998, 16(4): 366-372.
- [2] Niu H B, Liu W X, Wan F H. Invasive effects of *Ageratina adenophora* Spreng (Asteraceae) on soil microbial community and physical and chemical properties. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7): 3051-3060.
- [3] Wang Y Z, Zhao B Y, Fan Z F, Fan Y Y, Tan J C. The advance in *Eupatorium adenophorum* Spreng and its damage. *Progress In Veterinary Medicine*, 2005, 26(5): 45-48.
- [4] Arunachalam K, Arunachalam A, Melkania N P. Influence of soil properties on microbial populations, activity and biomass in humid subtropical mountainous ecosystems of India. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 30: 217-223.
- [5] Papes M, Peterson A T. Predicting the potential invasive distribution for *Eupatorium adenophorum* Spreng. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2003, 21: 137-142.
- [6] Lu P, Sang W G, Ma K P. Progress and Prospects in research of an exotic invasive species, *Eupatorium adenophorum*. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(6): 1029-1037.
- [7] Bohlmann F, Rajindran K G. Six cadinene derivatives from *Ageratina adenophora*. *Phytochemistry*, 1981, 20: 1432-1433.
- [8] Baruah N C, Sarma J C, Sarma S, Sharma R P. Seed germination and growth inhibitory cadinenes from *Eupatorium adenophorum* Spreng. *Journal of Chemical Ecology*, 1994, 20: 1885-1892.
- [9] Palá-Paúl J, Pérez-Alonso M J, Velasco-Negueruela A, Sanz J. Analysis by gas chromatography mass spectrometry of the volatile components of *Ageratina adenophora* Spreng., growing in the Canary Islands. *Journal of Chromatography A*, 2002, 947: 327-331.
- [10] Ding Z H, Guo Y B, Ding J K. Chemical constituents from the flowers of *Eupatorium adenophorum*. *Acta Botanica Yunnanica*, 1999, 21(4): 505-511.
- [11] Zhao X, Zheng G W, Niu X M, Li W Q, Wang F S, Li H S. Terpenes from *Eupatorium adenophorum* and their allelopathic effects on *Arabidopsis* seed germination. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, 57(2): 478-482.
- [12] Song Q S, Fu Y, Tang J W, Feng Z L, Yang C R. Allelopathic potential of *Eupatorium adenophorum*. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(3): 362-365.
- [13] Guenther A B, Monson R K, Fall R. Isoprene and monoterpene emission rate variability: observations with eucalyptus and emission rate algorithm development. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96: 10799-10808.
- [14] Jakobsen H B, Olsen C E. Influence of climatic factors on rhythmic emission of volatiles from *Trifolium repens* flowers *in situ*. *Planta*, 1994, 192: 365-371.
- [15] Sharkey T D, Loreto F. Water stress, temperature and light effects on the capacity for isoprene emission and photosynthesis of Kudau leaves. *Oecologia*, 1993, 95: 328-333.
- [16] Armelle V A, Gu H, Dorn S. How rainfall, relative humidity and temperature influence volatile emissions from apple trees *in situ*. *Phytochemistry*, 2005, 66: 1540-1550.
- [17] Hu Y J, Ren Q, Jin Y J, Li Z Y, Chen H J. Diurnal cycle of emission of volatile compounds from *Pinus massoniana* and *Pinus elliottii*. *Acta*

Ecologica Sinica, 2007, 27(2): 565-570.

- [18] Gouinguene S P, Turlings T C J. The Effects of Abiotic Factors on Induced Volatile Emissions in Corn Plants. *Plant Physiology*, 2002, 129: 1296-1307.
- [19] Sharkey T D, Chen X, Yeh S. Isoprene increases thermotolerance of fosmidomycin-fed leaves. *Plant Physiology*, 2001, 125: 2001-2006.
- [20] Loreto F, Velikova V. Isoprene produced by leaves protects the photosynthetic apparatus against ozone damage, quenches ozone products, and reduces lipid peroxidation of cellular membranes. *Plant Physiol*, 2001, 127: 1781-1787.
- [21] Martin D, Gershenzon J, Bohlmann J. Induction of Volatile Terpene Biosynthesis and Diurnal Emission by Methyl Jasmonate in Foliage of Norway Spruce. *Plant Physiology*, 2003, 132(3): 1586-1598.

参考文献:

- [1] 强胜. 世界性恶性杂草-紫茎泽兰研究的历史及现状. *武汉植物学研究*, 1998, 16(4): 366-372.
- [2] 牛红榜, 刘万学, 万方浩. 紫茎泽兰入侵对土壤微生物群落和理化性质的影响. *生态学报*, 2007, 27(7): 3051-3060.
- [3] 王银朝, 赵宝玉, 樊泽锋, 樊月圆, 谭承建. 紫茎泽兰及其危害研究进展. *动物医学进展*, 2005, 26(5): 45-48.
- [6] 鲁萍, 桑卫国, 马克平. 外来入侵种紫茎泽兰研究进展与展望. *植物生态学报*, 2005, 29(6): 1029-1037.
- [10] 丁智慧, 郭玉彬, 丁靖垲. 紫茎泽兰的化学成分. *云南植物研究*, 1999, 21(4): 505-511.
- [12] 宋启示, 付昀, 唐建维, 冯志立, 杨崇仁. 紫茎泽兰的化学互感潜力. *植物生态学报*, 2000, 24(3): 362-365.
- [17] 胡永建, 任琴, 金幼菊, 李镇宇, 陈华君. 马尾松、湿地松挥发性化学物质的昼夜节律释放. *生态学报*, 2007, 27(2): 565-570.