

虫害马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb) 邻枝针叶挥发物及其内源茉莉酸甲酯的快速变化

胡永建¹, 任 琴^{1,2}, 李镇宇^{1,3}, 金幼菊^{1,*}, 陈华君¹

(1. 北京林业大学, 北京 100083; 2. 内蒙古集宁师专, 集宁 012000;
3. 北京林业大学森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要:对盆栽马尾松针叶进行接虫咬食危害处理后,通过 TCT-GC/MS 分析了同一株受害枝相邻的健康枝针叶挥发物的成分及相对含量的时序变化。结果表明:萜烯类化合物是邻枝针叶挥发物的主要成分,其次是含氧化合物、含氮化合物等。与对照相比,多数挥发物的相对含量 1h 略高于对照,2h 维持较高水平。同时,用 GC/MS 分析了邻枝针叶不同时间序列中茉莉酸甲酯的含量,结果表明:虫害马尾松邻枝针叶 1h 茉莉酸甲酯含量就有所升高,2h 显著高于对照,是对照的近 1 倍。证明马尾松受到虫害后,启动了体内的防御系统,并诱导邻枝产生抗性。

关键词:马尾松;邻枝针叶;挥发性化学物质;内源茉莉酸甲酯;快速变化

文章编号:1000-0933(2008)11-5331-07 中图分类号:Q143 文献标识码:A

Rapid changes in volatile compounds and endogenous methyl jasmonates from the adjacent healthy branch needles of damaged *Pinus massoniana*

HU Yong-Jian¹, REN Qin^{1,2}, LI Zhen-Yu^{1,3}, JIN You-Ju^{1,*}, CHEN Hua-Jun¹

1 Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Inner Mongolia Jining Teachers Advanced College, Jining 012000, China

3 Beijing Forestry University Key Laboratory of Forest Silviculture and Conservation. Beijing 100083, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(11): 5331 ~ 5337.

Abstract: After one branch needles of potted plant *Pinus massoniana* was fed by *Dendrolimus Punctatus*, the composition and relative contents of volatile organic compounds (VOCs) from the adjacent upper branch needles of insect-damaged branch at different times was analyzed by TCT-GC/MS. The results showed that terpenes were the dominant, while the others such as oxygenated and nitrogenous compounds were less abundant VOCs. Most of VOCs in treated plants had higher contents than those in the control after 1 h treatment and remained much high levels at 2 h. The content of methyl jasmonic acids (MeJA) in adjacent needles of infected *Pinus massoniana* was increased after 1h treatment and nearly doubled that of control plants at 2h. The data indicates that the defensive system of *Pinus massoniana* was initiated and leading to the resistance reaction of the neighborhood undamaged branches by inset-pest.

Key Words: *Pinus massoniana*; adjacent needle; volatile chemical compounds; endogenous methyl jasmonates; rapid

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(30330490)

收稿日期:2008-01-25; 修订日期:2008-08-06

作者简介:胡永建(1983~),男,河南省人,博士生,主要从事化学生态学研究. E-mail: hu713th@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: youjujin@bjfu.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30330490)

Received date: 2008-01-25; **Accepted date:** 2008-08-06

Biography: HU Yong-Jian, Master candidate, mainly engaged in chemical ecology. E-mail: hu713th@163.com

changes

植食性昆虫诱导的植物挥发物可以抵御昆虫侵害或者吸引它们的天敌,也可以诱导邻近植物产生防御反应^[1~4]。已有的研究表明:当单个叶片受到植食性昆虫危害时,整个植株将释放大量的挥发性有机物,这种由植物向高层营养级所发出的信号被称为“求救信号”^[5]。而茉莉酸类是响应并介导受害植物防御基因表达的重要信号物质之一。

马尾松毛虫(*Dendrolimus punctatus* Walker)是我国南方造林树种马尾松(*Pinus massoniana* Lamb)的优势害虫,具有周期性暴发的规律。有关马尾松诱导抗性的研究报道主要集中于受害针叶次生物质的变化。马尾松抗松毛虫抗性研究组^[6]测定表明马尾松抗 11 植株针叶中 β -蒎烯较一般树种高出 1 倍以上,对松毛虫具有拒产卵性和拒食性。王燕^[7]等采用人工模拟危害方法分析了马尾松针叶内次生代谢物质含量的变化,表明马尾松受害后的应激反应是一种快速、间断、被调节的过程。任琴等^[8,9]分别对野外及盆栽虫害马尾松针叶挥发物的时序变化进行了研究,结果表明受害针叶萜烯类化合物多数在 1h 升高。但有关受害马尾松快速诱导抗性能否传递至邻枝针叶,进而引起整个植株产生防御反应未见报道。本试验研究了马尾松虫害枝的相邻健康枝挥发物及其内源茉莉酸的变化,旨在探讨虫害马尾松诱导效应在植株内的传递性及持续的范围时间等,初步表明茉莉酸类信号物质对受害马尾松邻枝针叶挥发物的调控作用,为进一步阐明植物的防御策略提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 植物材料与虫源

选用具有 8 个轮枝的盆栽马尾松作为试验树种。马尾松毛虫五龄幼虫由北京林业大学森保实验室提供。

1.2 植物挥发物及其马尾松针叶的采集

选择树龄相同、长势一致的 6 株盆栽马尾松做标记。其中 3 株分别接入一定量的马尾松毛虫 5 龄幼虫于第 4 轮枝上(将虫放入笼中,罩在选定所危害枝条上),危害 1d 后造成轻度受害(针叶损失量达 25%~40%),去掉虫;另取 3 株松树作为健康对照。分别采集受害后第 1、2、4、8、24、48、72 天受害马尾松针叶上一轮枝即第 5 轮枝对侧枝条的挥发物,即为邻枝挥发物。取样方法为动态顶空收集法,即用 Reynolds 微波炉袋套在待测枝上,在短时间内抽出袋内空气后,充入经过活性炭和 GDX101(60~80 目)过滤过的空气。然后开始采样,使袋内气体循环经过装有吸附剂 TenaxTA(200 mg,60~80 目)的石英玻璃管($L=16$ cm, $\Phi_i=312$ mm)。采样时间为 15min,流速为 100 ml/min。取样后将样品管放入干燥器中,以备室内测定。重复 3 次。

另按照上述方法造成马尾松受害后,按照上述时间点采集邻枝针叶。采样均匀、随机,采样后立即放入液氮罐中,然后置于 -80°C 冰箱中保存,用于内源茉莉酸含量的测定。

1.3 挥发物的测定

采用 TCT-GC-MS 进行测定:

1.3.1 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)。

1.3.2 仪器的工作条件

TCT 的主要条件: System Pressure 20Kpa, Rod temperature 250°C (10min), Trap inject 260°C 。

GC 的工作条件:色谱柱 DB-5 Low Bleed/MS 柱(60m \times 0.32mm \times 0.5 μm),通过液氮脱附进样,He 载气。程序升温 40°C (3min) — $6^{\circ}\text{C}/\text{min}$ — 270°C (5min), Post run 280°C (5min)。

MS 的工作条件: Ionization Mode EL; E-energy 70ev; Mass range 29~350 amu; I/F 250°C , Src 200°C , Emission Current 150 μA ,全扫描,每次扫描所用时间 0.4,质谱扫描范围 m/z 19~435。

1.3.3 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马尾松挥发物成分的鉴定。通过面

积归一化法以各类挥发物的相对含量定量。

1.4 内源茉莉酸的提取制备

称取 0.5g 左右的马尾松针叶,采用陈华君等^[10]方法完成样品的前期处理工作。每个处理重复 3 次。

1.5 茉莉酸的定性和定量分析

采用 GC/MS(型号同上)进行测定。气相色谱柱:DB-5-MS 石英毛细管柱(30m × 0.32mm × 0.25 μ m, J&W Scientific, Agilent Technologies, USA)。

GC 程序升温条件:初始温度 50 $^{\circ}$ C,以 20 $^{\circ}$ C/min 的速率升至 180 $^{\circ}$ C,保持 4min,然后以 10 $^{\circ}$ C/min 升到 220 $^{\circ}$ C,保持 15min。载气为氦气,流速 0.8ml/min。GC 进样口温度 280 $^{\circ}$ C,电子恒流控制,无分流进样,进样体积 1 μ l。

MS:离子轰击源(70eV),接口温度:250 $^{\circ}$ C,离子源温度 200 $^{\circ}$ C,Emission Current 150 μ A,Det 500V。全扫描,扫描速度 0.4s/次,扫描范围 m/z29-450。

用茉莉酸和二氢茉莉酸标样进行 GC/MS 全扫描分析,采用 Xcalibur1.2 版本软件、NIST98 谱图库定性,确定茉莉酸的保留时间。

茉莉酸的定量分析采用 GC-MS-SIM 完成。Me-JA 的选择特征离子(m/z)为 151、224;内标 DHJA 的选择特征离子(m/z)为 153、226。

2 结果与分析

2.1 受害马尾松邻枝挥发物的快速变化

虫害后邻枝针叶中所检测到的挥发性化学物质与受害马尾松针叶相同,包括烷烃、苯系物、萜烯类化合物、含氧化合物、含氮化合物等。与健康对照相比,萜烯类化合物的变化大致分成两种情况(表 1)。(1) α -散花烯、柠檬烯、 β -水芹烯、 ρ -薄荷-1,4(8)-二烯、罗汉柏烯、大香叶烯 D 等萜烯类化合物和辛醛、壬醛、癸醛、冰片乙酯、戊二烯二丁酯、环己基异硫氰酯等含氧化合物 1h 含量略高于对照,2h 相对含量维持较高水平,中间有些时间点虽然含量有所降低,但 72h 含量再次升高,但 α -蒎烯在 2h 相对含量降低。三环烯 4h 相对含量才升高,72h 仍然高于对照。(2)蒎烯、4(10)-宁烯、 β -蒎烯、 α -水芹烯 2,6-二甲基-1,3,5,7-辛四烯、 β -石竹烯、 α -石竹烯的相对含量在 2h 升高,多数 72h 再次升高。

一些醛类、酯类的变化如表 2 所示。与健康对照相比,这些挥发物均在 1h 含量升高,2h 继续升高,4~48h 之间有些含量低于对照,72h 再次升高。这是由于植物用于防御的物质和能量是有限的,因此,受害后马尾松邻枝的反应并非持续无控,而是快速、间断和被调节的,反映了其应激反应过程是一种时空动态的变化^[11]。

上述表 1、表 2 的结果显示,除 α -蒎烯外,蒎烯、4(10)-宁烯、 β -蒎烯、散花烯、柠檬烯、 β -水芹烯、 ρ -薄荷-1,4(8)-二烯等多数单萜的相对含量 2h 是对照的 1 倍以上;冰片乙酯、 β -石竹烯和 α -石竹烯的相对含量 2h 达到最高,罗汉柏烯和大香叶烯 D 的相对含量 2h 开始升高,72h 达到峰值。此外,醛类化合物如辛醛、壬醛、癸醛等相对含量也在 2h 显著升高(图 1)。

上述结果表明,当马尾松针叶受害后,其邻枝针叶检测到的挥发物种类与受害针叶相同,且多数挥发物在 2h 升高,而虫害马尾松针叶释放的挥发物 1h 就升高^[8],说明邻枝针叶挥发物的变化晚于受害针叶。这是因为马尾松受害针叶首先产生信号物质,然后将这些信号传递到植物系统针叶使其产生反应。近些年来,一些分子如同电信号和水信号一样成为植物可能的伤信号,其中茉莉酸类就具有传播植物伤信号的能力。例如,由于茉莉酸是番茄中 Pin 基因表达的激发子而成为系统信号,这些激发子在韧皮部中进行主动转运,并借助水集流将伤信号从木质部被动运输到维管中^[11]。

2.2 受害马尾松邻枝内源茉莉酸甲酯含量的变化

与对照相比,虫害马尾松邻枝针叶 1h 茉莉酸甲酯含量就有所升高,2h 显著高于对照,是对照的近 1 倍。尽管 4~72h 中各时间点含量与对照有所不同,但方差分析结果表明差异不显著(图 2)。整个茉莉酸的时序

表1 马尾松虫害邻枝萜烯类化合物的变化

Table 1 Changes in terpene compounds from damaged *P. massoniana* adjacent needles

化合物 compounds	处理 treatment	时间 Time(h)						
		1	2	4	8	24	48	72
1	CK	0.11 ± 0.003	0.22 ± 0.009	0.11 ± 0.004	0.07 ± 0.0032	0.11 ± 0.006	0.09 ± 0.04	0.07 ± 0.02
	FA	0.09 ± 0.006	0.09 ± 0.02	0.12 ± 0.03	0.14 ± 0.08	0.10 ± 0.001	0.18 ± 0.07	0.11 ± 0.006
2	CK	44.21 ± 2.44	90.04 ± 7.14	62.50 ± 10.22	55.74 ± 6.91	49.61 ± 3.63	52.22 ± 3.85	54.94 ± 3.39
	FA	68.38 ± 4.12	70.50 ± 2.66	40.82 ± 1.69	26.35 ± 3.29	64.65 ± 13.87	30.79 ± 10.97	62.47 ± 7.36
3	CK	0.74 ± 0.24	0.33 ± 0.12	0.99 ± 0.19	1.24 ± 0.09	0.99 ± 0.17	0.85 ± 0.42	0.52 ± 0.17
	FA	0.59 ± 0.12	1.00 ± 0.25	0.72 ± 0.10	0.75 ± 0.19	0.62 ± 0.12	0.84 ± 0.19	0.82 ± 0.08
4	CK	0.07 ± 0.006	0.02 ± 0.003	0.02 ± 0.005	0.05 ± 0.02	0.05 ± 0.03	0.04 ± 0.001	0.14 ± 0.09
	FA	0.02 ± 0.01	0.05 ± 0.03	0.03 ± 0.02	0.02 ± 0.01	0.04 ± 0.01	0.06 ± 0.02	0.08 ± 0.01
5	CK	14.78 ± 5.14	5.64 ± 2.91	12.76 ± 0.96	24.41 ± 1.36	22.21 ± 7.87	20.69 ± 5.54	32.99 ± 4.91
	FA	6.74 ± 1.67	7.82 ± 1.55	6.85 ± 2.33	3.89 ± 0.67	9.47 ± 0.83	6.54 ± 2.13	5.51 ± 0.59
6	CK	0.38 ± 0.53	0.01 ± 0.01	0.25 ± 0.43	0.04 ± 0.01	0.02 ± 0.006	0.04 ± 0.003	0.03 ± 0.01
	FA	0.21 ± 0.09	0.10 ± 0.08	0.35 ± 0.18	1.31 ± 0.71	0.22 ± 0.03	1.32 ± 1.17	0.07 ± 0.01
7	CK	0.12 ± 0.02	0.01 ± 0.005	0.10 ± 0.01	0.08 ± 0.006	ND	ND	ND
	FAN	0.15 ± 0.07	0.19 ± 0.08	0.09 ± 0.03	0.10 ± 0.08	0.15 ± 0.04	0.09 ± 0.07	0.39 ± 0.29
8	CK	0.72 ± 0.24	0.23 ± 0.07	0.70 ± 0.07	1.32 ± 0.14	0.69 ± 0.002	0.90 ± 0.35	0.13 ± 0.08
	FAN	1.46 ± 0.04	1.53 ± 0.47	1.54 ± 0.42	1.29 ± 0.59	2.49 ± 0.77	3.00 ± 1.71	2.16 ± 0.92
9	CK	1.61 ± 0.16	0.72 ± 0.04	1.25 ± 0.07	3.85 ± 0.59	1.76 ± 0.44	3.62 ± 0.31	9.07 ± 0.11
	FAN	2.17 ± 2.09	2.69 ± 0.54	1.73 ± 1.19	0.97 ± 0.01	4.71 ± 0.67	4.11 ± 0.95	3.97 ± 0.52
10	CK	0.02 ± 0.001	ND	0.02 ± 0.003	0.02 ± 0.019	0.05 ± 0.04	0.03 ± 0.009	0.01 ± 0.008
	FAN	0.02 ± 0.001	0.02 ± 0.01	0.02 ± 0.007	0.02 ± 0.01	0.06 ± 0.05	0.02 ± 0.001	0.08 ± 0.01
11	CK	0.13 ± 0.02	0.04 ± 0.04	0.12 ± 0.02	0.19 ± 0.03	0.31 ± 0.08	0.24 ± 0.03	0.06 ± 0.03
	FAN	0.19 ± 0.03	0.16 ± 0.04	0.11 ± 0.02	0.16 ± 0.04	0.20 ± 0.04	0.22 ± 0.07	0.26 ± 0.07
12	CK	3.11 ± 0.75	0.74 ± 0.18	4.63 ± 0.16	6.42 ± 0.27	7.18 ± 0.56	6.87 ± 1.17	0.55 ± 0.23
	FAN	2.40 ± 0.31	2.84 ± 0.62	1.72 ± 0.26	1.37 ± 0.47	1.51 ± 0.56	1.50 ± 0.80	2.37 ± 0.91
13	CK	0.26 ± 0.11	0.13 ± 0.06	0.37 ± 0.04	0.53 ± 0.05	1.55 ± 0.38	0.62 ± 0.43	0.22 ± 0.01
	FAN	0.66 ± 0.40	0.71 ± 0.07	0.47 ± 0.24	0.45 ± 0.29	0.23 ± 0.13	0.46 ± 0.33	2.68 ± 0.92
14	CK	0.27 ± 0.07	0.04 ± 0.007	0.14 ± 0.09	0.32 ± 0.23	0.30 ± 0.05	0.43 ± 0.054	0.19 ± 0.02
	FAN	0.14 ± 0.04	0.09 ± 0.006	0.06 ± 0.03	0.06 ± 0.03	0.12 ± 0.08	0.06 ± 0.03	0.11 ± 0.01
15	CK	0.04 ± 0.006	0.75 ± 0.39	0.01 ± 0.003	0.001 ± 0.001	0.07 ± 0.04	0.02 ± 0.001	ND
	FAN	0.06 ± 0.05	0.07 ± 0.01	0.02 ± 0.01	0.03 ± 0.02	0.04 ± 0.03	0.01 ± 0.005	0.09 ± 0.06

表中挥发物均为 TIC 强度在 E3 以上,平均值(±标准差)为 3 次重复的均值,“ND”指未检测到;处理中 CK-健康对照,FAN-虫害邻枝,下同;化合物中 1-三环烯,2- α -蒎烯,3-蒎烯,4-4(10)-宁烯,5- β -蒎烯,6- α -水芹烯,7-*o*-散花烯,8-柠檬烯,9- β -水芹烯,10-2,6-二甲基-1,3,5,7-辛四烯,11-*p*-薄荷-1,4(8)-二烯,12- β -石竹烯,13-罗汉柏烯,14- α -石竹烯,15-大香叶烯 D TIC strength of volatile organic compounds in the table were above E3. Mean were value (±sd) from three replications, “ND” no detected. CK-control, FAN-feeding adjacent needles; the same below; 1-tricyclene, 2- α -pinene, 3-camphene, 4-4(10)-Thujene, 5- β -pinene, 6- α -phellandrene, 7-*o*-Cymene, 8-limonene, 9- β -phellandrene, 10-2,6-Dimethyl-1,3,5,7-Octatetraene, 11-*p*-Metha-1.4(8)-diene, 12- β -Caryophyllene, 13-thujopsene, 14- α -Caryophyllene, 15-Germacrene D

表2 马尾松虫害邻枝醛类等化合物的变化

Table 2 Changes in aldehyde and other compounds from damaged *P. massoniana* adjacent needles

化合物 Compounds	处理 Treatment	时间 Time(h)						
		1	2	4	8	24	48	72
1	CK	0.07 ± 0.02	0.003 ± 0.001	0.13 ± 0.06	0.08 ± 0.01	0.36 ± 0.05	0.11 ± 0.03	0.02 ± 0.004
	FA	0.22 ± 0.03	0.37 ± 0.09	0.17 ± 0.05	0.19 ± 0.09	0.34 ± 0.26	0.17 ± 0.13	0.27 ± 0.22
2	CK	0.13 ± 0.03	0.03 ± 0.01	0.53 ± 0.04	0.49 ± 0.07	1.77 ± 0.44	0.49 ± 0.38	0.11 ± 0.07
	FA	0.68 ± 0.10	1.12 ± 0.31	0.46 ± 0.23	0.89 ± 0.39	0.53 ± 0.52	0.54 ± 0.35	1.00 ± 0.81
3	CK	0.08 ± 0.02	0.02 ± 0.01	0.37 ± 0.08	0.47 ± 0.31	1.66 ± 0.26	0.48 ± 0.12	0.16 ± 0.05
	FA	0.81 ± 0.24	1.49 ± 0.68	0.61 ± 0.32	1.33 ± 0.81	0.63 ± 0.35	0.68 ± 0.39	1.50 ± 1.13
4	CK	0.07 ± 0.03	0.03 ± 0.01	0.08 ± 0.01	0.19 ± 0.01	0.24 ± 0.03	0.18 ± 0.06	0.01 ± 0.007
	FA	0.22 ± 0.03	0.34 ± 0.30	0.13 ± 0.04	0.05 ± 0.01	0.16 ± 0.04	0.08 ± 0.04	0.15 ± 0.08
5	CK	0.12 ± 0.03	0.01 ± 0.01	0.69 ± 0.09	1.01 ± 0.67	2.13 ± 0.09	1.18 ± 0.41	0.16 ± 0.01
	FA	1.02 ± 0.29	1.22 ± 0.49	0.74 ± 0.12	1.04 ± 0.46	0.86 ± 0.11	0.43 ± 0.34	3.11 ± 2.71
6	CK	0.03 ± 0.005	0.13 ± 0.04	0.02 ± 0.01	0.06 ± 0.03	0.05 ± 0.01	0.07 ± 0.03	0.01 ± 0.005
	FA	0.09 ± 0.02	0.14 ± 0.09	0.02 ± 0.006	0.04 ± 0.01	0.04 ± 0.03	0.03 ± 0.02	0.15 ± 0.01

1:辛醛,2:壬醛,3:癸醛,4:冰片乙酯,5:戊二烯二丁酯,6:环己基异硫氰酯 1: Octanal, 2: Nonanal, 3: Decanal, 4: Borneol acetate, 5: Glutaric acid, dibutyl ester, 6: cyclohexyl isothiocyanate

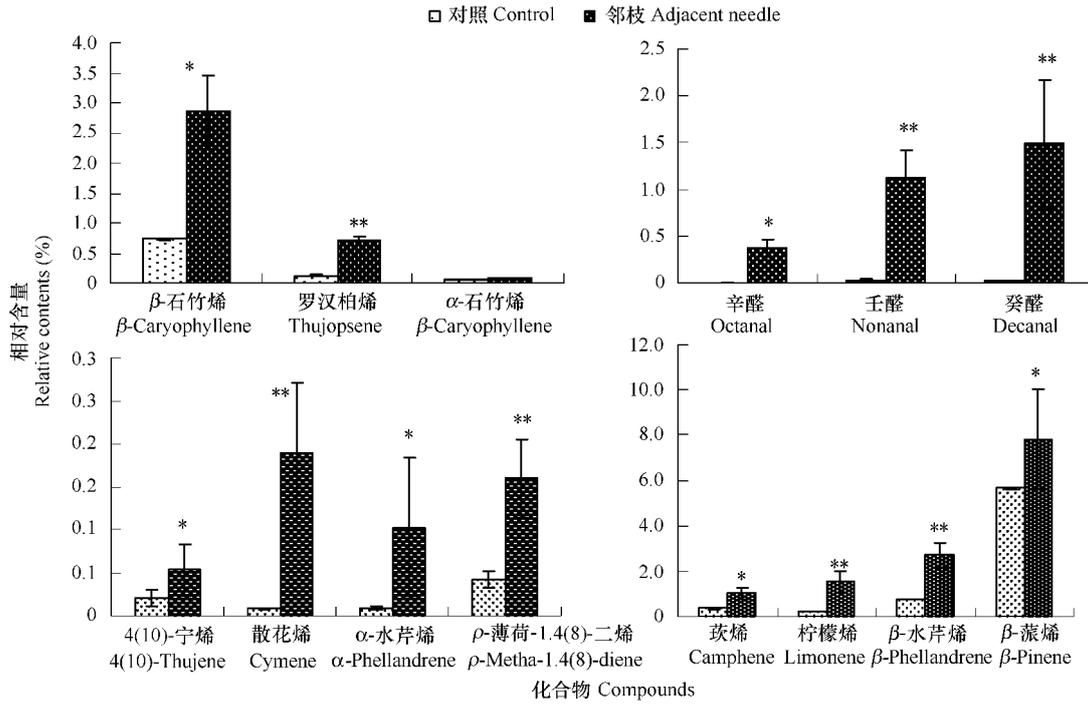


图 1 受害马尾松 2h 邻枝针叶挥发物的变化

Fig. 1 The changes in some volatile of adjacent needles at 2h after damaged *P. massoniana*

β-石竹烯 β-Caryophyllene; 罗汉柏烯 Thujopsene; α-石竹烯 α-Caryophyllene; 辛醛 Octanal; 壬醛 Nonanal; 癸醛 Decanal; 4(10)-宁烯 4(10)-Thujene; o-散花烯 o-Cymene; α-水芹烯 α-Phellandrene; ρ-薄荷-1,4(8)-二烯; ρ-Metha-1.4(8)-diene; 茨烯 Camphene; 柠檬烯 Limonene; β-水芹烯 β-Phellandrene; β-蒎烯 β-Pinene

变化呈现波浪式,说明马尾松针叶受害后启动了体内的防御系统,使茉莉酸含量在短时间内迅速升高,这是因为许多基因所编码的生物合成酶在受害后 30 ~ 60min 进行上游调节,导致内源茉莉酸在受害叶中积累^[12],并在 1 ~ 2h 出现激素合成高峰,此时一系列基因随之活化,并产生相应的诱导蛋白,从而增强了受害叶片的防御功能。同时,损伤部位产生的某种原初信号分子也启动了体内的防御系统,引起受害马尾松邻枝产生系统抗性。

3 结论与讨论

植物株内和株间存在着防御信息的交流,而这种信息传递的介质则是受伤植物释放出的挥发性化合物^[13~15]。已有研究表明:多于 100 种植物被昆虫咬食后,其局部和系统部位会发生反应^[16~19],如棉花受害后系统叶片在 48h 才出现反应,而玉米虫害后 5 ~ 6h 系统叶片挥发物的释放即增加^[20]。杨迪等^[21]对人工损伤的复叶槭进行研究,结果表明系统叶片中茉莉酸的含量在损伤处理后 3h 达到最大浓度值,并在 9h 以内都保持这种较高的浓度。

与任琴等^[8,9]研究结果比较,可以看出受害马尾松针叶挥发物的变化早于邻枝针叶。表明受害部位能够产生信号物质且需要进行传递。叶片受到伤害后,会迅速引起细胞膜去极化、Ca²⁺ 流入、蛋白磷酸化级联等,出现快速的基因表达,调节茉莉酸等激素合成途径,最终引起受害叶和邻枝叶防御基因的表达^[22]。

在调节植物伤基因表达的信号分子中,茉莉酸是虫害诱导反应中的一种关键性信号。昆虫取食植物时破

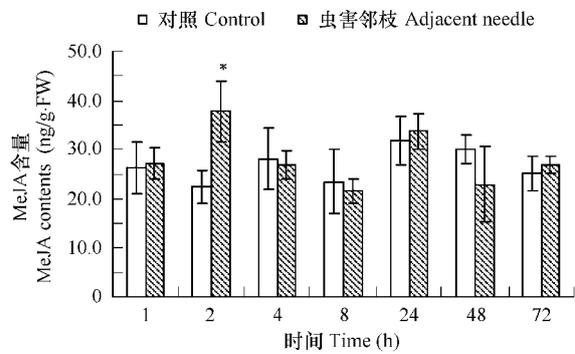


图 2 受害马尾松邻枝针叶茉莉酸甲酯的变化

Fig. 2 The changes in MeJA from damaged *P. massoniana* adjacent needles

坏了植物伤口处的组织细胞,植物细胞壁的果胶碎片被水解酶分解为寡聚半乳糖醛酸片断,它是蛋白酶抑制剂诱导因子的主要成分,由此激活伤口周围组织的 *pin* 基因,从而产生局部防御。与此同时内源的系统肽运输到整个植株,通过茉莉酸信号途径激活远离伤口组织的 *pin* 基因,产生系统防御作用^[23]。植物蛋白酶抑制剂在植物体内的系统诱导是一个信号级联放大的过程,昆虫取食的信号由质膜外的系统肽传至膜内的亚油酸,再通过多个步骤的酶促反应产生茉莉酸^[24,24],反过来,JA 活化与挥发物合成有关的酶,使挥发物的释放量增加。本实验中受害马尾松邻枝针叶挥发物和茉莉酸含量增加,并且在时间上的一致性也间接说明了茉莉酸对挥发物的调节作用。然而,虫害枝向邻枝传递的信号物质是否就是茉莉酸还有待进一步证实,另外茉莉酸类对挥发物的具体调节机制也尚未明了。因此,进一步从分子机理上阐明植物防御反应的相关机制,找出参与植物通讯的有效信号分子,将开拓人类对生命和自然认知的新视野,为森林病虫害的防治提供新的思路。

References:

- [1] Dicke M, Sabelis M W. Plant strategies of manipulating predator-prey interaction through allelochemicals: Prospects for application in pest control. *J Chem Ecol*, 1990b, 16:3091—3118.
- [2] De Moraes C M, Mescher M C, Tumlinson J H. Caterpillar-induced nocturnal plant volatiles repel nonspecific females. *Nature*, 2001, 410:577—580.
- [3] Takabayashi J, Dicken M. Plant-carnivore mutualism through herbivore-induced carnivore attractants. *Trends Plant Sci*, 1996, 1:109—113.
- [4] Aharoni A P, Giri A, Deuerlein S, *et al.* Terpenoid Metabolism in Wild-Type and Transgenic Arabidopsis Plants. *The Plant Cell*, 2003, 15: 2866—2884.
- [5] Dicke M, Sabelis M. Costs and benefits of chemical information conveyance; proximate and ultimate factors. In BD Roitberg, MB Isman, eds, *Insect Chemical Ecology: An Evolutionary Approach*. New York: Chapman and Hall, 1992:122—155.
- [6] The research Group of the Resistance of Masson Pine to Masson Pine Moth. A study on resistance mechanism of the No. 11 Masson Pine tree to the Caterpillar. *Scientia Silvae Sinicae*, 1990, 26(2): 133—141.
- [7] Wang Y, Ge F, Li Z Y. Spatial-temporal trends of induced chemical change in pine *Pinus massoniana*. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(8): 1256—1261.
- [8] Ren Q, Li Z Y, Hu Y J. Volatile compounds release from damaged *Pinus massoniana* and *Pinus elliotii*. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25 (11): 2928—2932.
- [9] Ren Q, Jin Y J, Hu Y J, *et al.* Rapid Changes of Induced Volatile Organic Compounds in *Pinus massoniana*. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42 (4): 65—70.
- [10] Chen H J, Zhang F J, Ren Q, *et al.* Research on Jasmonic acid from plant material extraction, purification and quantitative. *Journal of Instrumental Analysis*, 2005, 24 (Supplement): 138—140.
- [11] Guy L de Bruxelles, Michael R. Roberts. Signals regulating multiple responses to wounding and herbivores. *Critical reviews in plant sciences*, 2001, 20 (5): 487—521.
- [12] Creelman R A, Tiemey M L, Mullet J E. Jasmonic acid / methyl jasmonate accumulate in wounded soybean hypocotyls and modulate wound gene-expression. *Proc Natl Acad Sci USA*. 1992, 89: 4938—4941.
- [13] Dicke M, Takabayashi J, Posthumus M A, *et al.* Plant-phytoseiid interactions mediated by herbivore induced plant volatiles: variation in production of cues and in responses of predatory mites. *Exp Appl Acarol*, 1998, 22: 311—333.
- [14] Maeda T, Takabayashi J, Yano S, *et al.* Effects of light on the tritrophic interaction between kidney bean plants, two-spotted spider mites and predatory mites, *Amblyseius womersleyi* (Acari Phytoseiidae). *Exp Appl Acarol*, 2000, 24: 415—425.
- [15] Dicke M. Evolution of induced indirect defense of plants. In: Tollrian R, Harvell C eds. *The Ecology and Evolution of Inducible Defenses*. Princeton: Princeton University Press, 1999. 62—68.
- [16] Karban R, Balwin I T, Baxte K J, *et al.* Communication between plants: induced resistance in wild tobacco plants following clipping of neighboring sagebrush. *Oecologia*, 2000, 125: 66—71.
- [17] Loughrin J H, Manukian A, Heath R R, *et al.* Diurnal cycle emission of induced volatile terpenoids from herbivore-injured cotton plants. *Proc Natl*

- Acad Sci USA, 1994, 91:11836—11840.
- [18] Turlings T C J, Loughrin J H, McCall PJ, *et al.* How caterpillar-damaged plants protect themselves by attracting parasitic wasps. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1995, 92:4169—4174.
- [19] Devoto A, Turner J G. Regulation of jasmonate-mediated plant responses in *Arabidopsis*. *Annals of Botany*, 2003, 92:329—337.
- [20] Turlings T C J, Tumlinson J H. Systemic release of chemical signals by herbivore-injured corn. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1992, 89: 8399—8402.
- [21] Yang D, Li Q, Hu Z H, *et al.* Content changes of abscisic acid and jasmonic acid in damaged and neighboring healthy ashleaf maple seedlings. *Journal of Beijing Forestry University*, 2003, 4 (25): 35—38.
- [22] Guy L. de Bruxelles, Michael R. Roberts. Signals regulating multiple responses to wounding and herbivores. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2001, 20 (5):487—521.
- [23] Bishop P, Pearce G, Bryant J E, *et al.* Isolation and characterization of the proteinase inhibitor inducing factor from tomato leaves: Identity and activity of poly- and oligogalacturonide fragments. *J Biol Chem*, 1984, 259:13172—13177.
- [24] Zong N, Yan Y H, Wang C Z. Plant proteinase inhibitor: induction and adaptation in insects. *Acta Entomologica Sinica*, 2003, 46 (4): 533—539.
- [25] Tumlinson J H, Lait C G. Biosynthesis of fatty acid amide elicitors of plant volatiles by insect herbivores. *Archives of Insect Biochemistry and Physiology*, 2005, 58: 54—68.

参考文献:

- [6] 马尾松毛虫抗性研究组. 抗性植株的抗性机制研究. *林业科学*, 1990, 26 (2): 133~140.
- [7] 王燕, 戈峰, 李镇宇. 马尾松诱导化学物质的时空动态. *生态学报*, 2001, 21(8):1256~1261.
- [8] 任琴, 李镇宇, 胡永建, 等. 受害马尾松、湿地松挥发性化学物质的释放. *生态学报*, 2005, 25(11): 2928~2932.
- [9] 任琴, 金幼菊, 胡永建, 等. 马尾松诱导挥发性有机化合物的快速变化. *林业科学*, 2006, 42(4):65~70.
- [10] 陈华君, 张凤娟, 任琴, 等. 植物材料中茉莉酸的提取、纯化及其定量方法的研究. *分析测试学报*, 2005, 24 (增刊):138~140.
- [21] 杨迪, 李庆, 胡增辉, 等. 损伤与邻近健康复叶槭植株内脱落酸和茉莉酸含量变化. *北京林业大学学报*, 2003, 25(4):35~38.
- [23] 宗娜, 阎云花, 王琛柱. 昆虫对植物蛋白酶抑制的诱导及适应机制. *昆虫学报*, 2003, 46 (4): 533~539.