

桉树抗桉树枝瘿姬小蜂效果评价分析*

张华峰^{1,2}

(1. 厦门市绿化中心, 福建 厦门 361004; 2. 福建农林大学 林学院, 福建 福州 350002)

摘要 通过桉树枝瘿姬小蜂 *Leptocybe invasa* 产卵危害、针刺损伤和外源茉莉酸甲酯 (MeJA) 喷施等不同诱导桉树 *Eucalyptus* spp. 抗性处理, 测定桉叶中与化学防御相关生理生化物质的变化, 并用模糊相似优先比法分析比较不同诱导方式对受害植株上的桉树枝瘿姬小蜂的生长发育、繁殖力和种群趋势等生物学指标的影响, 综合评价桉树诱导抗性的抗虫效果。结果表明: 对桉树植株喷施 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ MeJA 诱导处理, 能够诱导桉树植株产生与桉树抗桉树枝瘿姬小蜂危害较为相似的化学防御效果, 证明了喷施外源 MeJA 在诱导抗性中有积极的作用, 可作为该害虫综合治理的一种有效的手段。

关键词 桉树枝瘿姬小蜂; 桉树; 诱导防御反应; 模糊相似优先比; 抗性

中图分类号: S763.7 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2022) 06-0029-06

Resistance Evaluation of *Eucalyptus* Against *Leptocybe invasa* by Different Induction Treatments

ZHANG Huafeng^{1,2}

(1.Xiamen Greening Management Center, Xiamen Fujian 361004, China; 2.College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou Fujian 350002,China)

Abstract Through different induction treatments, such as *Leptocybe invasa* damage, mechanical damage, and exogenous methyl jasmonate (MeJA) spraying, we had measured changes of physiological and biochemical substances in eucalyptus leave which play a role as chemical defense to the wasps. By different induction treatments, the effects on indicators of the growth, development, reproductive activity and population trends of *L.invasa* were studied by the method of fuzzy similitude priority. The results showed that: Vague comparative method on similarity evolution between oviposition-induction and other induction treatments, showed that spraying $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ MeJA can make the similar result as oviposition, demonstrated spraying MeJA plays an active role in induced resistance, which can be used as the supplementary method for integrated pest management to the wasps.

Key words *Leptocybe invasa*; *Eucalyptus* spp.; induced defense response; fuzzy similitude priority; resistance

桉树枝瘿姬小蜂 *Leptocybe invasa* 属膜翅目 Hymenoptera 姬小蜂科 Eulophidae 昆虫, 是一种危害桉属植物的外来入侵害虫^[1]。该蜂最早在中东和地中海地区发现并造成危害, 随后入侵到印度、

中国和巴西等桉树种植大国, 目前该蜂已在大洋洲、亚洲和欧洲等 5 大洲 45 个国家和地区分布定殖。桉树 *Eucalyptus* spp. 是世界三大速生树种之一, 具有适应性强、轮伐期短、繁殖容易等特点,

* 基金项目: 福建省农业科技重点项目 (2012N008)。

第一作者: 张华峰 (1977—), 男, 高级工程师, 主要从事林业、园林有害生物综合防控技术研究, E-mail: atugen@126.com。

已在 5 大洲 120 个国家和地区种植, 种植总面积超过 2 500 万 hm^2 。我国自 19 世纪末开始引种桉树^[2], 在华南及西南地区大面积推广种植, 面积达 512 万 hm^2 , 排名全球第三^[3]。2007 年在我国广西东兴首次发现桉树枝瘿姬小蜂, 由于其具有传播途径多, 扩散能力强, 防治难度大等特点^[4], 目前已传播扩散至广西、海南和福建等 8 省区^[5-7], 对我国桉树人工林造成严重危害, 给桉树产业发展造成巨大损失^[4-5]。张华峰等^[7-8]、魏初奖等人^[9]采用筛选桉树抗虫品种(无性系), 淘汰易感品种(无性系)等方法, 有效控制了福建大部分桉树栽种区桉树枝瘿姬小蜂的发生危害。但目前在园林绿化行道树, 或小部分桉树种植的北缘地区仍种植抗寒性较强但易感虫桉树品种(无性系), 仍需探索更高效的防控措施。研究植物自身的防御能力和机制, 探索增强植物防御能力的技术手段, 是当今植物抗虫性研究的前沿和热点^[10]。有研究表明, 植物在植食性昆虫取食后能够在被害部位或植株系统内, 通过植物诱导防御途径, 降低营养物质的分配, 增加次生代谢产物的含量, 迅速增强防御酶活性等一系列化学防御反应, 降低其对昆虫的适应性, 诱导植物产生抗性, 以抵御昆虫进一步取食^[11-15]。植物诱导抗性一旦被激发, 可在一定范围和时间内有效地抵御植食性昆虫的侵害, 并具有较为广谱的抗虫作用^[16-17]。目前有关诱导桉树产生抗虫性的研究报道较少。本研究通过桉树枝瘿姬小蜂产卵危害、针刺损伤和外源茉莉酸甲酯(MeJA)喷施等不同的诱导处理后, 测定桉叶中与化学防御相关生理生化物质的变化, 并用模糊相似优先比法分析比较不同的诱导处理对桉树枝瘿姬小蜂生长发育和种群动态的影响, 综合评价桉树诱导抗性的抗虫效果, 为防控桉树枝瘿姬小蜂提供新的思路。

1 材料与方法

1.1 材料来源

供试苗木为巨桉 *Europhylla grandis* 无性系组培苗, 苗高 50 cm。在福建省漳州市微绿园林绿化工程公司苗圃的巨桉林内, 于 2021 年 8 月中旬桉树枝瘿姬小蜂羽化期采集初羽化的雌成蜂供试。供试 MeJA(纯度 $\geq 95\%$) 采购于西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司, 试验时将 MeJA 溶于乙醇中, 加蒸馏水分别配制成不同浓度的溶液备用。

1.2 诱导处理

1.2.1 产卵诱导(Y_1) 选 15 株供试苗木, 在每株苗木的东、西、南、北 4 个方向各选取 3 条嫩枝, 用自制尼龙网袋套上, 每枝分别接入 20 头当天羽化出瘿的处女雌蜂, 在雌蜂产卵危害 1 d 后作为虫害诱导处理组供试。

1.2.2 针刺损伤诱导(Y_2) 选 15 株供试苗木, 按照 1.2.1 方法选取枝条, 用钢针在枝的每片嫩叶叶柄、主脉基部及嫩枝上针刺 20 个伤口, 人工模拟昆虫产卵损伤, 处理 1 d 后作为针刺损伤诱导处理组供试。

1.2.3 MeJA 诱导 选 60 株供试苗木, 在苗木上用小型喷雾器分别均匀地喷洒 $0.05 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (Y_3)、 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (Y_4)、 $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (Y_5) 和 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (Y_6) 4 种浓度的 MeJA 溶液, 每种浓度各 15 株苗木, 将处理过的苗木分别放置于养虫笼(透明塑料薄膜密封)内, 处理 1 d 后作为 MeJA 诱导处理组供试。

1.3 接虫方法

诱导处理后, 在供试苗木的东、南、西、北 4 个方向各选取 3 条健康枝条, 套上网袋, 每枝分别接入 20 头当天羽化出瘿的处女雌蜂。

1.4 样品采集和测定

诱导处理 1 d 后从试验处理苗木的东、南、西、北 4 个方向各随机剪取 10 片未损伤的嫩叶, 组成混合样品装入保鲜袋内, 迅速带回实验室冷冻保存备用。

测定叶片营养物质和次生物质含量试验时, 先用蒸馏水冲洗叶片并晾干, 再用牛皮纸包好放烘箱, 在 60°C 恒温条件下持续烘干 48 h 后, 用粉碎机粉碎, 过 40 目筛, 装入自封袋, 放入干燥器中保存备用。分别用亚硝酸钠-硝酸铝比色法、钨酸钠-磷钼酸比色法、Folin-酚法、蒽酮比色法和凯氏定氮法, 测定各处理样品中黄酮、单宁、总酚、可溶性糖(多糖)和蛋白质含量^[9-10], 每份样品重复测定 3 次。

测定叶片植物相关酶活性试验时, 按上述的取样方式剪取桉树嫩叶, 测定桉叶中保护性酶苯丙氨酸解氨酶 PAL、超氧化物歧化酶 SOD、过氧化物酶 POD 和多酚氧化酶 PPO 等 4 种保护酶活性^[11-12], 以及胰蛋白酶抑制剂 TI 和胰凝乳蛋白酶抑制剂 CI 等 2 种植物蛋白酶抑制剂活性^[13-14], 每份样品重复测定 3 次。

以上测定都以健康苗木作为对照组 (CK)。诱导处理和对照各设 3 次重复。

1.5 生物学观察

1.5.1 产卵刻痕 接虫处理后 10 d, 打开网袋, 对每样枝各选择 5 片叶进行观察, 统计叶柄上产卵刻痕数。

1.5.2 生物测定 在桉树枝瘿姬小蜂羽化高峰期, 从不同处理的植株上, 随机剪取带有虫瘿的样枝, 分别置于不同的养虫盒内, 放入人工气候箱 (设定温度 30℃, 湿度 80% RH, 光暗条件 L : D=18 h : 6 h) 内收蜂, 每天定时收集统计由虫瘿中羽化出孔的桉树枝瘿姬小蜂成虫。采集 100 只雌成虫, 迅速放入三星 (RSG5SFPN) 冰箱, 在 -20℃ 条件下速冻 10 min。随后随机取 30 只雌成虫, 放入生理盐水 (0.9% NaCl 无菌水溶液) 内, 在体视镜下解剖观察, 并记录每只小蜂的怀卵量。用昆虫采集管收集当天羽化出蜂的桉树枝瘿姬小蜂雌成虫, 每管 30 只, 放在室温下 (24~28℃), 每天观察 2 次, 记录桉树枝瘿姬小蜂雌成虫的存活数, 直至全部死亡, 统计雌成虫寿命。

1.5.3 出蜂数量 桉树枝瘿姬小蜂羽化出孔后, 选取 30 个虫瘿, 统计每个虫瘿上圆形的羽化孔做为出蜂数量。

1.6 种群趋势指数计算及数据分析

为了更好地比较评价不同诱导处理对桉树枝瘿姬小蜂生长发育及种群增长效应, 分别统计桉

树枝瘿姬小蜂存活率、雌性比和怀卵数, 并用种群趋势指数 (index of population trend, I) [18] 计算, $I = SE_s P_f P_{\text{♀}}$ 。式中, S 为存活率, 每个虫瘿出蜂数 / 虫瘿上的产卵刻痕数; E_s 为指定标准卵量, 以从对照植株羽化出的雌成虫所怀卵数量为标准; P_f 为达到标准卵量的比例; $P_{\text{♀}}$ 为桉树枝瘿姬小蜂雌虫比例。

数据统计分析在 SPSS17.0 和 DPS v7.05 版统计软件进行模糊相似优先比分析 [19]。本实验用经不同诱导处理后的桉叶中营养和次生代谢物质含量、保护酶活性和蛋白酶抑制剂活性等, 与桉树化学防御相关生理生化物质和桉树枝瘿姬小蜂生长发育指标等指标做为待测数据。对待测数据 x_i

通过标准化 $y_i = (x_i - \bar{x}) / s$, 其中, $\bar{x}$ 为平均值, $s = \sqrt{1/(n-1) \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$, 进行无量纲处理后, 进行模糊相似优先比分析, 综合评价桉树诱导抗性的抗虫效果。

2 结果与分析

2.1 桉叶营养物质和次生代谢物质含量测定结果

经不同诱导处理后桉树叶主要营养物质和次生代谢物质含量测定结果见表 1。结果表明: 经诱导处理 1 d 后, 不同处理间的桉叶中可溶性糖含量、多糖含量差异极显著 ($P < 0.01$), 较对照组相比含量

表 1 桉叶营养物质和次生代谢物质含量测定及方差分析结果

mg · g⁻¹

Table 1 Results of variance analysis and contents of nutrients and secondary metabolites in *Eucalyptus* leaves

诱导处理 Treatments	营养物质 Nutrients			次生物质 Secondary metabolite		
	可溶性糖 (X ₁) Soluble sugar	多糖 (X ₂) Polysaccharide	蛋白质 (X ₃) Protein	黄酮 (X ₄) Flavone	单宁 (X ₅) Tannin	总酚 (X ₆) Total phenol
Y ₁	24.36 ± 1.01 dB	30.56 ± 0.10dD	17.28 ± 0.04aA	13.73 ± 0.04cBCD	15.32 ± 0.07abAB	18.48 ± 0.03aA
Y ₂	24.77 ± 0.23cdB	31.39 ± 0.07bB	16.24 ± 0.07bB	13.68 ± 0.04cD	15.42 ± 0.01abA	17.82 ± 0.03cC
Y ₃	26.87 ± 0.40abA	30.90 ± 0.09cC	15.51 ± 0.02cC	13.90 ± 0.02aA	15.27 ± 0.05bAB	18.12 ± 0.02bB
Y ₄	26.44 ± 0.19bA	30.81 ± 0.02cC	16.14 ± 0.06bB	13.74 ± 0.03cBCD	14.32 ± 1.04cB	17.86 ± 0.07cC
Y ₅	25.26 ± 0.19cB	30.20 ± 0.05eE	15.08 ± 0.07dD	13.81 ± 0.07bABC	15.29 ± 0.01bAB	17.84 ± 0.04cC
Y ₆	26.39 ± 0.14bA	30.15 ± 0.04eE	15.09 ± 0.08dD	13.83 ± 0.05abAB	16.07 ± 0.10aA	18.15 ± 0.05bB
CK	27.34 ± 0.03aA	32.11 ± 0.03aA	17.22 ± 0.10aA	13.71 ± 0.04cCD	15.33 ± 0.07abAB	17.85 ± 0.04cC

注: Y₁ 表示产卵危害, Y₂ 表示机械损伤, Y₃ 表示 0.05 mmol · L⁻¹MeJA, Y₄ 表示 0.1 mmol · L⁻¹MeJA, Y₅ 表示 0.5 mmol · L⁻¹MeJA, Y₆ 表示 1.0 mmol · L⁻¹MeJA, CK 表示喷施清水处理; 同列中不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$); 不同大写字母表示差异极显著 ($P < 0.01$)。

Note: Y₁: oviposition induction, Y₂: mechanical damage, Y₃: 0.05 mmol · L⁻¹MeJA, Y₄: 0.1 mmol · L⁻¹MeJA, Y₅: 0.5 mmol · L⁻¹MeJA, Y₆: 1.0 mmol · L⁻¹MeJA, and CK: spraying clean water for treatment. Different lower case letters in the same column showed significant difference ($P < 0.05$); Different capital letters showed significant difference ($P < 0.01$).

均有显著下降;不同处理间的桉叶中蛋白质含量差异极显著 ($P<0.01$),较对照组相比,除 Y_1 处理含量变化不大外,其余处理均有显著下降;不同处理间的桉叶中黄酮含量差异极显著 ($P<0.01$),较对照组相比,除 Y_2 处理含量略有下降外,其余处理均有显著上升;不同处理间的桉叶中单宁含量差异极显著 ($P<0.01$),较对照组相比,除 Y_6 处理含量略有上升外,其余处理变化不大;不同处理间的桉叶中总酚含量差异极显著 ($P<0.01$),较对照组相比, Y_1 、 Y_3 和 Y_6 处理含量有显著上升,其余处理变化不大。总体而言,诱导处理后桉叶相关营养物质含量处理组与对照相比含量有显著的下降,而次生物质中黄酮类等物质较对照相比含量有一定的上升。

2.2 桉叶保护酶活性和蛋白酶抑制剂测定结果

经不同诱导处理后桉树叶保护酶活性和蛋白酶抑制剂活性测定结果见表 2。结果表明:经诱导处理 1 d 后,不同处理间的桉叶中 PAL 活性值差异极显著 ($P<0.01$),较对照组相比,除 Y_2 处理活性值略有下降外,其余处理均有显著上升;不同处理间的桉叶中 SOD 活性值差异极显著 ($P<0.01$),较对照组相比,各处理均有显著上升;不同处理间的桉叶中 POD 活性值差异极显著 ($P<0.01$),较对照组相比,除 Y_2 处理略有下降外,其余各处理均有显著上升;不同处理间的桉叶中 PPO 活性值差异极显著 ($P<0.01$),较对照组相比,各处理均有显著上升;不同处理间的桉叶中 TI 活性值差异极

显著 ($P<0.01$),较对照组相比,各处理均有显著上升;不同处理间的桉叶中 CI 活性值差异极显著 ($P<0.01$),较对照组相比,各处理均有显著下降。总体而言,桉叶中 PAL、SOD、POD 和 PPO4 种保护酶活性较对照相比活性有显著的上升,而蛋白酶抑制剂中处理组 TI 活性较对照比有显著的上升,CI 活性与对照比有显著的下降。

2.3 桉树枝瘿姬小蜂生长发育和种群指标

经不同诱导处理后,接入桉树枝瘿姬小蜂雌成虫,经一个世代 (2~3 个月),观察桉树枝瘿姬小蜂子代生长发育指标,并计算种群趋势指数,结果见表 3。结果表明:以不同诱导处理后桉树为寄主,不同处理间的虫瘿中桉树枝瘿姬小蜂子代出蜂数差异极显著 ($P<0.01$),较对照组相比,除 Y_1 处理出蜂数有上升外,其余处理均有显著下降;不同处理间的虫瘿上桉树枝瘿姬小蜂产卵刻痕数差异极显著 ($P<0.01$),较对照组相比,除 Y_1 和 Y_2 处理产卵刻痕数有上升外,其余处理均有显著下降;不同处理间桉树枝瘿姬小蜂雌成虫怀卵量差异显著 ($P<0.01$),较对照组相比,除 Y_2 处理怀卵量变化不大外,其余处理均有显著下降。根据出蜂数、产卵刻痕数、怀卵量、雌性比等数据,计算桉树枝瘿姬小蜂存活率、达标卵量比率,并代入公式 (1) 中计算种群趋势指数 (X_{13})。结果表明,经诱导处理后,桉树枝瘿姬小蜂种群趋势指数 (X_{13}) 与对照组相比较有下降。

表 2 桉叶保护酶活性和蛋白酶抑制剂活性测定及方差分析结果

Table 2 Results of variance analysis and protective enzyme activity and protease inhibitor activity of *Eucalyptus* leaves

诱导处理 Treatments	保护酶 Protective enzyme				蛋白酶抑制剂 Protease inhibitor	
	PAL	SOD	POD	PPO	TI	CI
	(X_7)/ ($U \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$)	(X_8)/ ($U \cdot g^{-1}$)	(X_9)/ ($U \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$)	(X_{10})/ ($U \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$)	(X_{11})/ ($U \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$)	(X_{12})/ ($U \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$)
Y_1	36.10 ± 0.10aA	38.20 ± 0.23dD	2795.53 ± 42.97bB	76.31 ± 1.61cCD	32.69 ± 0.62dC	12.19 ± 1.92bAB
Y_2	21.26 ± 0.07gG	25.67 ± 0.12fF	1679.01 ± 18.84fF	85.30 ± 0.21bBC	27.19 ± 0.39bcABC	21.54 ± 1.42abAB
Y_3	25.21 ± 0.26eE	32.41 ± 0.03eE	1759.32 ± 28.66eE	75.67 ± 0.29cCD	13.31 ± 0.54bAB	15.33 ± 0.79abAB
Y_4	26.11 ± 0.02dD	40.93 ± 0.04cC	1860.84 ± 30.73dD	87.67 ± 0.28bB	14.53 ± 0.48bAB	16.53 ± 1.02abAB
Y_5	30.46 ± 0.02bB	45.14 ± 0.15aA	2147.50 ± 41.98cC	110.21 ± 9.65aA	19.62 ± 0.76bcdBC	18.48 ± 1.22bAB
Y_6	28.92 ± 0.16cC	43.04 ± 0.06bB	3237.60 ± 21.08aA	115.50 ± 5.25aA	30.58 ± 0.96cdBC	19.96 ± 1.62bB
CK	22.22 ± 0.11fF	23.85 ± 0.05gG	1689.21 ± 8.00fEF	65.69 ± 0.32dD	11.81 ± 0.15aA	25.35 ± 0.20aA

注: Y_1 表示产卵危害, Y_2 表示机械损伤, Y_3 表示 0.05 mmol · L⁻¹MeJA, Y_4 表示 0.1 mmol · L⁻¹MeJA, Y_5 表示 0.5 mmol · L⁻¹MeJA, Y_6 表示 1.0 mmol · L⁻¹MeJA, CK 表示喷施清水处理; 同列中不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$); 不同大写字母表示差异极显著 ($P<0.01$)。

Note: Y_1 : oviposition induction, Y_2 : mechanical damage, Y_3 : 0.05 mmol · L⁻¹MeJA, Y_4 : 0.1 mmol · L⁻¹MeJA, Y_5 : 0.5 mmol · L⁻¹MeJA, Y_6 : 1.0 mmol · L⁻¹MeJA, and CK: spraying clean water for treatment. Different lower case letters in the same column showed significant difference ($P<0.05$); Different capital letters showed significant difference ($P<0.01$).

表 3 桉树枝瘿姬小蜂生长发育和种群指标
Table 3 Indexes of growth, development and population trend of *L. invasa*

诱导处理 Treatments	出蜂数/(只/瘿) Number of wasps/ (quantity/gall)	产卵刻痕数/(个/瘿) Number of oviposition scars/(quantity/gall)	怀卵数/(粒/只) Number of eggs (quantity/female)	存活率/% Survival rate	雌性比 Female ratio	达标卵量比率 Percentage of eggs reaching the standard	种群趋势指数(X ₁₃) Population trend index
Y ₁	11.11 ± 2.71aA	14.33 ± 2.65aA	90.78 ± 16.28abAB	77.46	0.90	0.89	63.29
Y ₂	9.33 ± 2.55abcABC	11.78 ± 2.39bB	104.44 ± 13.05aA	79.20	0.95	1.02	71.58
Y ₃	8.44 ± 2.07bcdABC	5.56 ± 1.78cdC	98.33 ± 11.26aAB	80.02	0.91	0.96	71.25
Y ₄	7.56 ± 2.51cdBCD	5.00 ± 2.24cdC	88.56 ± 20.53abAB	75.60	0.92	0.87	61.82
Y ₅	6.67 ± 1.66deCD	4.94 ± 1.63cdC	86.44 ± 19.88abAB	49.44	0.90	0.85	38.51
Y ₆	5.33 ± 1.12eD	4.39 ± 1.71dC	74.56 ± 23.44bB	43.05	0.91	0.73	29.07
CK	10.44 ± 2.3abAB	6.78 ± 1.35cC	102.11 ± 17.58aA	76.99	0.94	1.00	73.90

注：Y₁ 表示产卵危害，Y₂ 表示机械损伤，Y₃ 表示 0.05 mmol · L⁻¹MeJA，Y₄ 表示 0.1 mmol · L⁻¹MeJA，Y₅ 表示 0.5 mmol · L⁻¹MeJA，Y₆ 表示 1.0 mmol · L⁻¹MeJA，CK 表示喷施清水处理；同列中不同小写字母表示差异显著 (*P*<0.05)；不同大写字母表示差异极显著 (*P*<0.01)。
Note: Y₁: oviposition induction, Y₂: mechanical damage, Y₃: 0.05 mmol · L⁻¹MeJA, Y₄: 0.1 mmol · L⁻¹MeJA, Y₅: 0.5 mmol · L⁻¹MeJA, Y₆: mmol · L⁻¹MeJA, and CK: spraying clean water for treatment. Different lower case letters in the same column showed significant difference (*P*<0.05); Different capital letters showed significant difference (*P*<0.01)

2.4 不同诱导处理模糊相似优先比分析

本实验将样品测试的桉叶中营养和次生代谢物质含量，和保护酶、蛋白酶抑制剂活性值等，以及桉树枝瘿姬小蜂种群趋势指数指标做为待测数据，并进行无量纲处理。以桉树枝瘿姬小蜂产卵损伤处理 (Y₁) 做为固定样本，其它处理做为假定样本，对数据进行模糊相似优先比分析，结果见表 4 和表 5。结果表明，桉树枝瘿姬小蜂产卵损伤处理 (Y₁) 与喷施 1.0 mmol · L⁻¹MeJA (Y₆=45) 诱导后，桉树叶相关化学防御物质和桉树枝瘿姬小蜂生长发育和种群动态变化较为相似，其次是喷施 0.5 mmol · L⁻¹MeJA 诱导处

理 (Y₅=47)，再次是喷施 0.1 mmol · L⁻¹ 诱导处理 (Y₄=53)。

3 讨论与结论

植物在生境中长期受到各种生物和非生物胁迫，从而逐渐形成了多种的防御反应来适应环境^[19]。植食性昆虫或环境胁迫下的植物应激反应机制是研究植物与植食性昆虫互作关系的重要课题，也是目前国内外研究的热点之一^[10]。诱导抗性是植物对昆虫或环境胁迫的应激反应机制，植物通过茉莉酸 (jasmonic acid, JA)、水杨酸 (salicylic acid, SA) 和乙烯 (ethylene, ET) 等信号

表 4 桉树枝瘿姬小蜂产卵损伤处理 (Y₁) 与其他诱导处理样本间绝对值
Table 4 Absolute values between oviposition induction treatment (Y₁) and other induction treatments

诱导处理 Treatment	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃
Y ₂	2.37	2.54	3.04	3.38	6.93	9.56	18.85	11.91	773.35	25.97	6.64	4.04	6.47
Y ₃	2.78	2.50	3.70	2.84	6.27	6.49	15.37	12.17	1035.59	22.17	20.53	9.04	1.40
Y ₄	2.59	1.62	4.68	1.89	6.11	6.27	10.36	5.49	986.52	21.91	16.95	7.08	5.59
Y ₅	1.34	0.06	5.58	1.33	0.80	0.15	3.30	1.77	426.09	6.99	12.22	7.27	36.37
Y ₆	0.67	1.36	1.29	1.08	3.11	5.49	7.23	3.19	691.55	1.19	5.13	2.16	39.73

表 5 桉树枝瘿姬小蜂产卵损伤处理 (Y₁) 对各诱导处理相似度
Table5 Similarity between oviposition induction treatment (Y₁) and induction treatment

诱导处理 Treatment	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	相似度 Similarity	相似度排序 Orders
Y ₂	3	5	2	5	5	5	5	4	3	5	2	2	3	56	4
Y ₃	5	4	3	4	4	4	4	5	5	4	5	5	1	63	5
Y ₄	4	3	4	3	3	3	3	3	4	3	4	3	2	53	3
Y ₅	2	1	5	2	1	1	1	1	1	2	3	4	4	47	2
Y ₆	1	2	1	1	2	2	2	2	2	1	1	1	5	45	1

途径间交叉作用,启动了植物防御反应系统,激活了相关防御基因的表达等途径来改变植物自身的化学成分,以提供植物的最佳防御体系,降低病虫害危害^[20-21]。研究表明桉树受桉树枝瘿姬小蜂产卵危害、机械损伤和喷施外源 MeJA 等不同诱导处理后,其叶片生理生化指标产生的显著变化,结果表明,诱导处理后桉叶相关营养物质含量处理组与对照相比含量有显著下降,而次生物质中黄酮类等物质较对照相比含量有一定的上升;桉叶中 PAL、SOD、POD 和 PPO4 种保护酶活性较对照相比活性有显著上升,而蛋白酶抑制剂中处理组 TI 活性较对照比有显著上升,CI 活性与对照比有显著下降。同时诱导处理对桉树枝瘿姬小蜂的生长发育、繁殖和种群趋势等生物学指标产生显著影响,研究结果表明经诱导处理后,桉树枝瘿姬小蜂种群趋势指数 (*I*) 与对照组相比较有下降。

用模糊相似优先比法分析比较了桉树枝瘿姬小蜂产卵损伤诱导与其它诱导处理,对桉树叶生理生化变化和寄生的桉树枝瘿姬小蜂生长发育、种群动态影响的相似程度,结果表明,喷施 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ MeJA 诱导能够产生与桉树枝瘿姬小蜂产卵危害较为相似的结果,证明了喷施外源 MeJA 在诱导抗性中有积极的作用,可作为害虫综合治理的一种手段。本研究表明,桉树植株的局部损伤诱导可造成全株性的系统防御反应。植物诱导防御反应是一个复杂、有机的整体,包括诸多方面与环节,影响桉树枝瘿姬小蜂生长发育和种群动态改变的途径及机理的研究,尚待进一步研究探讨。

参考文献

- [1] 赵丹阳,徐家雄,林明生,等.外来入侵害虫桉树枝瘿姬小蜂在中国的风险性分析[J].广东林业科技, 2009, 25(1): 37-40.
- [2] 祁述雄.中国桉树[M].北京: 中国林业出版社, 2002: 71-83.
- [3] 兰秀,刘永贤,宋同清,等.广西不同龄级桉树人工林植被与土壤特征及相关分析[J].中南林业科技大学学报, 2022(7): 127-136.
- [4] 吴耀军,常明山,李德伟,等.桉树枝瘿姬小蜂发育起点温度与有效积温的研究[J].广东林业科技, 2013, 29(6): 27-30.
- [5] MENDEL Z, PROTASOV A, FISHER N, et al. Taxonomy and biology of *Leptocybe invasa* gen. & sp.n. (Hymenoptera : Eulophidae), an invasive gall inducer on *Eucalyptus*[J]. Australian Journal of Entomology, 2004, 43(2): 101-113.
- [6] 彭欣,王瀚棠,郭春晖,等.入侵性致瘿害虫桉树枝瘿姬小蜂(膜翅目: 姬小蜂科) EST-SSR开发及隐种鉴定[J]. 林业科学, 2021, 57(9): 140-151.
- [7] 张华峰,康文通,陈顺立,等.不同桉树品系与桉树枝瘿姬小蜂危害关系的研究[J].福建林学院学报, 2012, 32(4): 345-349.
- [8] 张华峰.桉树枝瘿姬小蜂侵害机理及寄主桉树化学防御研究[D].福州: 福建农林大学, 2013.
- [9] 魏初奖,张华峰,陈德兰,等.福建省桉树枝瘿姬小蜂发生现状与防控对策[J].中国森林病虫, 2017, 36(4): 44-46.
- [10] 王冰,李慧敏,操海群,等.挥发性化合物介导的植物-植食性昆虫-天敌三级营养级互作机制及应用[J]. 中国农业科学, 2021, 54(8): 1653-1672.
- [11] 林东江,林港华,王亚如,等.茉莉酸甲酯诱导的玉米对粘虫生长发育的影响[J].南方农业学报, 2021, 52(9): 2465-2472.
- [12] 尹萍.不同玉米品种的抗虫性鉴定及其节肢动物群落特征分析[D].泰安: 山东农业大学, 2019.
- [13] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京: 高等教育出版社, 2001: 184-185.
- [14] 郝再彬.植物生理实验[M].哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004: 115-116.
- [15] 高俊凤.植物生理学实验指导[M].高等教育出版社, 2006: 217-221.
- [16] 杨金睿,肖关丽.植物抗虫生理研究进展[J].中国农学通报, 2021, 37(6): 130-136.
- [17] 高佳敏,高素红,高宝嘉.昆虫取食和机械损伤对葡萄叶片代谢物的影响[J].西北农业学报, 2019, 28(9): 1543-1551.
- [18] 张华峰.茉莉酸甲酯诱导巨桉对桉树枝瘿姬小蜂的抗性[J].森林与环境学报, 2016, 36(2): 216-220.
- [19] 孙佳照,吴筱萌,徐悦,等.小贯小绿叶蝉与其主要天敌空间关系研究方法的比较[J].植物保护, 2021, 47(5): 190-197.
- [20] 王诗宇,王志兴,张丽丽,等.植物防御反应的研究进展[J].江苏农业科学, 2021, 49(19): 39-45.
- [21] 赵婵,张蓬军,余利星,等.植食性昆虫适应植物防御反应的研究进展[J].昆虫学报, 2019, 62(1): 124-132.