

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

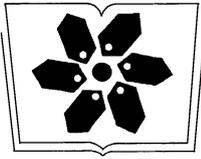
Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 23 期 Vol.32 No.23 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 23 期 2012 年 12 月 (半月刊)

目 次

中国石龙子母体孕期调温诱导幼体表型:母体操纵假说的实验检测	李 宏,周宗师,吴延庆,等	(7255)
同种或异种干扰对花鼠分散贮藏点选择的影响	申 圳,董 钟,曹令立,等	(7264)
曝气充氧条件下污染河道氨挥发特性模拟	刘 波,王文林,凌 芬,等	(7270)
贵州草海越冬斑头雁日间行为模式及环境因素对行为的影响	杨延峰,张国钢,陆 军,等	(7280)
青藏高原多年冻土区积雪对沼泽、草甸浅层土壤水热过程的影响	常 娟,王根绪,高永恒,等	(7289)
长沙城市斑块湿地资源的时空演变	恭映璧,靖 磊,彭 磊,等	(7302)
基于模型数据融合的千烟洲亚热带人工林碳水通量模拟	任小丽,何洪林,刘 敏,等	(7313)
农田氮素非点源污染控制的生态补偿标准——以江苏省宜兴市为例	张 印,周羽辰,孙 华	(7327)
用 PFU 微型生物群落监测技术评价化工废水的静态毒性	李朝霞,张玉国,梁慧星	(7336)
京郊农业生物循环系统生态经济能值评估——以密云尖岩村为例	周连第,胡艳霞,王亚芝,等	(7346)
基于遥感的夏季西安城市公园“冷效应”研究	冯晓刚,石 辉	(7355)
海南岛主要森林类型时空动态及关键驱动因子	王树东,欧阳志云,张翠萍,等	(7364)
不同播种时间对吉林省西部玉米绿水足迹的影响	秦丽杰,靳英华,段佩利	(7375)
黄土塬区不同品种玉米间作群体生长特征的动态变化	王小林,张岁岐,王淑庆,等	(7383)
密植条件下种植方式对夏玉米群体根冠特性及产量的影响	李宗新,陈源泉,王庆成,等	(7391)
沙地不同发育阶段的人工生物结皮对重金属的富集作用	徐 杰,敖艳青,张璟霞,等	(7402)
增强 UV-B 辐射和氮对谷子叶光合色素及非酶促保护物质的影响	方 兴,钟章成	(7411)
不同产地披针叶茴香光合特性对水分胁迫和复水的响应	曹永慧,周本智,陈双林,等	(7421)
芦芽山林线华北落叶松径向变化季节特征	董满宇,江 源,王明昌,等	(7430)
地形对植被生物量遥感反演的影响——以广州市为例	宋巍巍,管东生,王 刚	(7440)
指数施肥对楸树无性系生物量分配和根系形态的影响	王力朋,晏紫伊,李吉跃,等	(7452)
火烧伤害对兴安落叶松树干径向生长的影响	王晓春,鲁永现	(7463)
山地梨枣树耗水特征及模型	辛小桂,吴普特,汪有科,等	(7473)
两种常绿阔叶植物越冬光系统功能转变的特异性	钟传飞,张运涛,武晓颖,等	(7483)
干旱胁迫对银杏叶片光合系统 II 荧光特性的影响	魏晓东,陈国祥,施大伟,等	(7492)
神农架川金丝猴栖息地森林群落的数量分类与排序	李广良,丛 静,卢 慧,等	(7501)
碱性土壤盐化过程中阴离子对土壤中镉有效态和植物吸收镉的影响	王祖伟,弋良朋,高文燕,等	(7512)
两种绣线菊耐弱光能力的光合适应性	刘慧民,马艳丽,王柏臣,等	(7519)
闽楠人工林细根寿命及其影响因素	郑金兴,黄锦学,王珍珍,等	(7532)
旅游交通碳排放的空间结构与情景分析	肖 潇,张 捷,卢俊宇,等	(7540)
北京市妫水河流域人类活动的水文响应	刘玉明,张 静,武鹏飞,等	(7549)
膜下滴灌技术生态-经济与可持续性分析——以新疆玛纳斯河流域棉花为例	范文波,吴普特,马枫梅	(7559)
高温胁迫及其持续时间对棉蚜死亡和繁殖的影响	高桂珍,吕昭智,夏德萍,等	(7568)
桉树枝瘿姬小蜂虫瘿解剖特征与寄主叶片生理指标的变化	吴耀军,常明山,盛 双,等	(7576)
西南桦纯林与西南桦×红椎混交林碳贮量比较	何友均,覃 林,李智勇,等	(7586)
长沙城市森林土壤 7 种重金属含量特征及其潜在生态风险	方 晰,唐志娟,田大伦,等	(7595)
专论与综述		
城乡结合部人-环境系统关系研究综述	黄宝荣,张慧智	(7607)
陆地生态系统碳水通量贡献区评价综述	张 慧,申双和,温学发,等	(7622)



封面图说: 麋鹿群在过河——麋鹿属于鹿科,是中国的特有动物。历史上麋鹿曾经广布于东亚地区,到 19 世纪时,只剩下在北京南海子皇家猎苑内一群。1900 年,八国联军攻陷北京,麋鹿被抢劫一空。1901 年,英国的贝福特公爵用重金从法、德、荷、比四国收买了世界上仅有的 18 头麋鹿,以半野生的方式集中放养在乌邦寺庄园内,麋鹿这才免于绝灭。在世界动物保护组织的协调下,1985 年起麋鹿从英国分批回归家乡,放养到北京大兴南海子、江苏省大丰等地。这是在江苏省大丰麋鹿国家级自然保护区放养的麋鹿群正在过河。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201111081691

吴耀军,常明山,盛双,邹东霞,蒋学建,黄华艳. 桉树枝瘿姬小蜂虫瘿解剖特征与寄主叶片生理指标的变化. 生态学报, 2012, 32(23): 7576-7585.

Wu Y J, Chang M S, Sheng S, Zou D X, Jiang X J, Huang H Y. Physiological responses of *Eucalyptus* trees to infestation of *Leptocybe invasa* Fisher & La Salle. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(23): 7576-7585.

桉树枝瘿姬小蜂虫瘿解剖特征与 寄主叶片生理指标的变化

吴耀军^{1,*}, 常明山¹, 盛双², 邹东霞¹, 蒋学建¹, 黄华艳¹

(1. 广西壮族自治区林业科学研究院, 国家林业局中南速生材繁育实验室, 广西优良用材林资源培育重点实验室 南宁 530002;

2. 广西大学林学院, 南宁 530004)

摘要: 采用人工接蜂、桉树组织石蜡切片和生化组分测定等方法研究了桉树受桉树枝瘿姬小蜂诱导后的生理生化响应机制。结果表明: DH201-2 叶柄角质层厚度和油囊数量均较 GL-UG9 的厚、多, 且差异均达到极显著水平 ($P_{\text{角质层厚度}} = 0.00001 < 0.01$, $P_{\text{油囊数量}} = 0.00209 < 0.01$), 但是 GL-UG9 叶柄表皮细胞厚度和维管束数量均较 DH201-2 厚、多, 差异分别达到显著水平 ($P = 0.015215 < 0.05$) 和极显著水平 ($P = 0.002375 < 0.01$), DH201-2 茎皮层薄壁细胞厚度、油囊直径、维管束数量较 GL-UG9 厚、多, 差异分别为显著 ($P_{\text{皮层薄壁细胞厚度}} = 0.04071 < 0.05$)、极显著 ($P_{\text{油囊直径}} = 0.000016 < 0.05$)、极显著 ($P_{\text{维管束数量}} = 0.00000 < 0.01$)。而 GL-UG9 茎角质层和表皮细胞厚度均较 DH201-2 厚, 差异达到了极显著水平 ($P_{\text{角质层厚度}} = 0.00167$, $P_{\text{表皮细胞厚度}} = 0.00000 < 0.01$); 桉树枝瘿姬小蜂虫瘿为组织瘿, 由内到外可以分为: 营养组织层、薄/厚壁组织层、维管束层、皮层、表皮等结构; 接种桉树枝瘿姬小蜂成虫后, 桉树叶片的可溶性总糖、游离氨基酸、叶绿素含量均升高, 差异达到了极显著水平 ($P < 0.01$), 但是蛋白质、pH 值、类黄酮、总酚的变化没有达到显著水平 ($P > 0.05$); 吡哆乙酸氧化酶、过氧化物、过氧化氢酶活力均有不同程度的升高。研究显示桉树枝瘿姬小蜂入侵诱导了桉树一系列的生理生化变化, 实验结果为抗桉树枝瘿姬小蜂桉树无性系的选育技术体系构建提供了理论基础。

关键词: 桉树无性系; 桉树枝瘿姬小蜂; 虫瘿; 解剖特征; 生理指标

Physiological responses of *Eucalyptus* trees to infestation of *Leptocybe invasa* Fisher & La Salle

WU Yaojun^{1,*}, CHANG Mingshan¹, SHENG Shuang², ZOU Dongxia¹, JIANG Xuejian¹, HUANG Huayan¹

1 Guangxi Zhuang Autonomous Region Forestry Research Institute, Key Laboratory of Central South Fast-growing Timber Cultivation of Forestry Ministry of China, Guangxi Key Laboratory of Superior Timber Trees Resource Cultivation, Nanning 530002, China

2 College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004, China

Abstract: The gall wasp *Leptocybe invasa* Fisher & La Salle is a significant pest to eucalyptus. The physiological responses of eucalyptus clones (DH201-2 and GL-UG9) infested by *L. invasa* were investigated using artificial inoculation at different wasp densities, microtome sectioning, microscopic observation, and chemical analysis. The results indicated that the stem and petiole cross-sections of DH201-2 and GL-UG9 had similar structures that were typical of dicotyledonous plants. The tissues were clearly divided into an outer epidermis, cortex, vascular bundles, and medullary structure. However, the petiole epidermal cells of DH201-2 had significantly more oil capsules than GL-UG9 ($P = 0.00209$), and the DH201-2

基金项目: 广西优良用材林资源培育重点实验室自主课题(12B0403); 广西林业科技项目(桂林科学[2009]3号); 广西林科院基本科研业务费专项(林科201003号)

收稿日期: 2011-11-08; 修订日期: 2012-08-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wuyj114@163.com

petiole cutin layer was thicker than that of GL-UG9 ($P=0.00001$). However the petiole epidermal cells of GL-UG9 were significantly thicker than those of DH201-2 ($P=0.015215$), and GL-UG9 had significantly more vascular bundles than DH201-2 ($P=0.002375$). In addition, in DH201-2, the stem cortex parenchyma cells were thicker ($P=0.04071$), the oil capsule diameter was greater ($P=0.00016$), and there were more vascular bundles ($P=0.00000$) than in GL-UG9, while in GL-UG9, the stem corneous layer was thicker ($P=0.00167$) and there were more epidermal cells ($P=0.00000$) than in DH201-2. Each gall contained about 10 insect larvae. The anatomical structure of the gall tissue, from inside to outside, was: nutritive tissue, thin/sclerenchyma layer, vascular bundle layer, cortex, epidermis. When the adult wasps were not dense, they formed small galls only in petioles, while leaves occasionally had calluses. As adult wasp density increased, females laid eggs in the veins of stems to form stem-petiole-vein galls. Early in gall formation, the larvae had not hatched, but the plant tissue organization had begun to differentiate, the normal vascular structure had been destroyed, and the vascular bundle layer structure had deformed. As the eggs hatched into larvae, a cortex vascular bundle formed outside the approximately spherical internal space. Further structural analysis of the *L. invasa* gall structure indicated that the gall was divided into several distinct layers that could be roughly classified, from inside to outside, into: nutrition organization layer (21.84 ± 0.42) μm , parenchyma layer (13.34 ± 0.19) μm , sclerenchyma layer (18.68 ± 1.13) μm , vascular bundle layer, cortex, and epidermis. The development of the gall destroyed the original plant internal organization, forming many internal chambers for larvae. Each internal chamber had a radius of about (211.61 ± 5.12) μm . The center of the gall was different from the eucalyptus oil capsule structure. In the middle of the thin/sclerenchyma layer was a crystal layer approximately $7.92 \mu\text{m} \times 4.92 \mu\text{m}$ in size; the crystals were disorganized and colorless. The average length of a mature gall was (16.10 ± 8.81) mm its average diameter was (3.05 ± 1.73) mm. After inoculation with *L. invasa*, the total sugar, soluble free amino acid, and chlorophyll contents of the eucalyptus leaves increased significantly ($P < 0.01$), but the pH and protein, flavonoid, and total phenol contents increased only slightly ($P > 0.05$). Moreover, the indole acetic acid oxidase, peroxidase, and hydrogen peroxidase enzyme activities increased at different rates. In conclusion, a series of physiological and biochemical changes in eucalyptus were induced by *L. invasa* galls. This study provided a theoretical basis to establish an improved breeding system for eucalyptus to minimize gall wasp damage.

Key Words: *Eucalyptus*; *Leptocybe invasa*; Gall; Anatomic characteristics; Physiological indices

瘿是植物组织在某些生物的机械性或分泌物(如激素、酶等)刺激下,细胞加速分裂、增生而形成的畸形构造,这种不正常的生长一般是由成虫诱导寄主植物组织时所释放的某些雌性激素,或者取食产生的分泌物刺激植物产生的,虫瘿内富含各种有机和无机营养,其特殊构造为昆虫的幼虫提供了能够吸收和储存营养物质的库。虽然虫瘿是由昆虫刺激产生引起,但是真正产生虫瘿的却是植物本身,受诱导后的植物不仅会形成虫瘿,还会产生一系列生理生化变化^[1-7]。通常情况下,虫瘿的表皮细胞较小、薄壁组织较多、结构排列紧凑,近瘿室薄壁细胞着色较重。虽然虫瘿和植物一体,但是其解剖结构却与正常器官组织明显不同,又并不严重影响周围正常组织的生长和生理活动^[2]。

目前许多研究报道了虫瘿的结构特点、营养假说、形态多样以及产生机制与寄主植物游离氨基酸、糖、过氧化物酶、酚类物质、组织液 pH 值之间的相互作用关系,如植物氨基酸与虫瘿的产生有关、过氧化物酶活性和单宁含量的增加能够对虫瘿产生起到防御性作用,而 pH 值又会影响酶促反应、叶绿素含量以及离子吸收的进程等^[2-7]。

桉树枝瘿姬小蜂(*Leptocybe invasa* Fisher & La Salle)隶属膜翅目 Hymenoptera, 姬小蜂科 Eulophidae, 是近年来为害桉树的一种重要的外来入侵虫害,成虫可在桉树嫩枝、叶柄及叶脉等处产卵并形成大量虫瘿,幼虫生活在虫瘿内^[8-12]。通过林间调查发现,推广种植的两个桉树无性系 DH201-2 和 GL-UG9 受桉树枝瘿姬小蜂为害后,仅 DH201-2 上形成大量虫瘿,两个无性系受害后枝条均呈现丛枝状,叶片细小^[1]。目前,关于桉树枝瘿

姬小蜂诱导的虫瘿结构形成差异和寄主叶片生理指标变化少有报道, 仅于 2010 年对受桉树枝瘿姬小蜂为害后的桉树叶片酚类物质含量进行过相关研究^[13-14]。但是均未对上述两个桉树无性系进行过形态结构、虫瘿结构和生理指标的综合比较分析。

本文主要研究了 DH201-2 和 GL-UG9 桉树无性系叶柄、茎以及 DH201-2 虫瘿的形成结构特征, 同时采用人工接种和生化组分测试的方法, 分析上述两个桉树无性系受桉树枝瘿姬小蜂诱导前后自身营养物质、次生物质含量、过氧化物酶活力等生理指标的变化, 从生理形态和生化的角度揭示了桉树与桉树枝瘿姬小蜂互作关系, 为抗桉树枝瘿姬小蜂桉树评价体系构建和监测治理技术提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 材料来源

试验用桉树无性系为 DH201-2 (巨圆桉 *E. grandis* × *E. tereticornis*)、GL-UG9 (巨尾桉 *E. grandis* × *E. urophylla*) , 树高约 1.5 m, 共计 90 株, 盆栽于室外隔离棚内。桉树枝瘿姬小蜂虫瘿采集和跟踪观察点位于广西老虎岭水库广西林科院试验林区。

1.2 切片方法

正常叶柄和茎 采集正常生长的桉树无性系 GL-UG9 和 DH201-2 的叶柄和茎, 各 30 个, 立即用 FAA 固定液固定, 采用常规石蜡切片法制片, 切片厚度 18—25 μm , 番红-固绿对染, 加拿大树胶封片, 用 NIKON ECLIPSE 50i 显微镜观察, 分析正常的结构特征, 并计算不同营养层厚度, 所有测量数据均为 10 个视野的平均值。

虫瘿徒手切片 由于 GL-UG9 接种后未见虫瘿, 采集不同时期 DH201-2 无性系上的虫瘿 50 个以上, 解剖, 用 NIKON MODEL C-DSS230 体视显微镜观察, 记录每个虫瘿内幼虫数量, 观察不同时期虫瘿特征。

虫瘿石蜡切片 通过接种和跟踪观察在 GL-UG9 上未见虫瘿, 试验仅剪取 DH201-2 无性系嫩梢叶柄和茎处肿大的虫瘿, 30 个, 长度约为 1 cm, 立即用 FAA 固定液固定, 采用常规石蜡切片法制片, 切片厚度 18—25 μm , 番红-固绿对染, 加拿大树胶封片, 用 NIKON ECLIPSE 50i 显微镜观察, 分析虫瘿的结构特征, 并计算不同营养层厚度以及瘿室体积等, 所有测量数据均为 10 个视野的平均值。

1.3 接种和营养等生化指标的测定方法

接种方法 将同一天羽化的桉树枝瘿姬小蜂雌成虫每 10 头为一组, 放入扎有小孔的封口袋内, 套袋接种到桉树嫩枝上, 每株接种 1 个枝条, 每个无性系 3 个重复, 待成虫全部死亡后取下, 测定桉树的生理指标, 以同批未接种的桉树为对照。

营养物质以及 pH 值 采用蒽酮比色法测定叶片可溶性总糖; 采用考马斯亮蓝法测定蛋白质含量; 采用茚三酮显色法测定游离氨基酸含量; 利用 pH 计测定叶片 pH 值^[15-20]。

吲哚乙酸氧化酶 参考刘萍等主编的《植物生理学实验技术》中测定吲哚乙酸氧化酶活力的方法, 略有改动^[21]。

酚类 参照孙萍等的方法, 采用香草醛比色法测定缩合单宁含量^[13, 22-23]。采用吴元华、李奕震等的方法测定类黄酮、花色苷和总酚的含量^[24-25]。将样品加入 1 mL 1% HCl 的甲醇溶液后, 提取、稀释, 震荡, 过滤, 在波长为 600 nm、530 nm、325 nm 处测定吸光值。以 $\text{OD}_{530} - \text{OD}_{600\text{nm}} = 0.1$ 作为一个花色苷单位。类黄酮直接以 $\text{OD}_{325\text{nm}}/\text{g}$ 鲜重表示。

过氧化物酶 采用愈创木酚法测定过氧化物酶活性^[26]。

过氧化氢酶活性 参照《植物生理学实验指导》中测定过氧化氢酶活性的方法, 略有改动^[17]。

叶绿素 采用乙醇-丙酮液浸提法测定叶片叶绿素 a、b 以及总量, 略有改动^[27-28]。

1.4 统计方法

采用 SPSS13.0 for Windows 软件计算原始数据的平均值和标准误, 并进行组间均值数据的 One-Way ANOVA 方差分析。

2 结果与分析

2.1 对桉树组织结构的影响

正常桉树无性系 DH201-2、GL-UG9 的叶柄和茎部解剖结构见图 1,2。从图 1,2 中可以看出,2 个桉树无性系叶柄和茎的横切结构基本相似,均为典型的双子叶植物的结构,从外向内明显的分为表皮、皮层、维管束、髓等结构,其中维管束均为无限维管束。但是 DH201-2 叶柄皮层细胞中油囊数量较多,而 GL-UG9 较少。

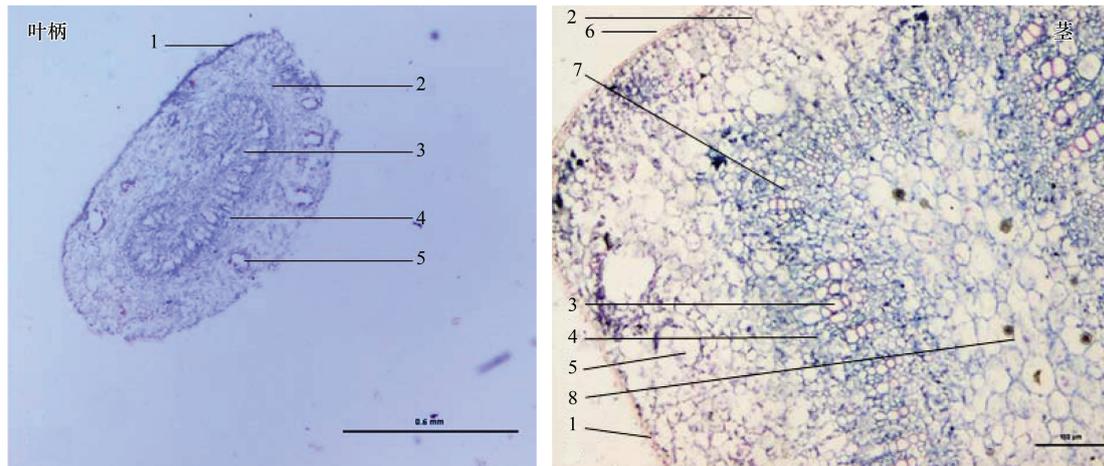


图 1 正常 DH201-2 无性系叶柄和茎的结构

Fig.1 The normal petiole and stem structure of DH201-2

a. 叶柄 petiole; b. 茎 stem; 1. 表皮; 2. 皮层; 3. 木质部; 4. 韧皮部; 5. 油囊; 6. 角质层; 7. 髓射线; 8. 髓

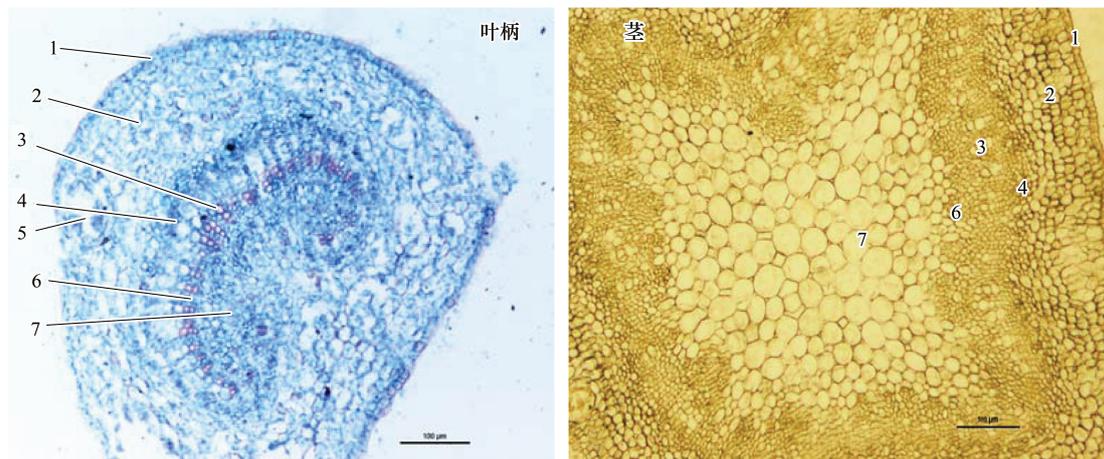


图 2 正常 GL-UG9 无性系叶柄和茎结构

Fig.2 The normal petiole and stem structure of GL-UG9

a. 叶柄; b. 茎; 1. 表皮; 2. 皮层; 3. 木质部; 4. 韧皮部; 5. 油囊; 6. 髓射线; 7. 髓

两个桉树无性系叶柄结构比较分析见表 1。DH201-2 角质层厚度为 GL-UG9 的 1.59 倍,差异达到了极显著水平 ($P=0.00001<0.01$),油囊数量也较 GL-UG9 多,且差异达到极显著水平 ($P=0.00209<0.01$),而 GL-UG9 的表皮细胞厚度较 DH201-2 厚,差异达到显著水平 ($P=0.015215<0.05$),维管束数量极显著多于 DH201-2 ($P=0.002375<0.01$)。

两个桉树无性系茎结构比较分析见表 2。DH201-2 皮层薄壁细胞较 GL-UG9 厚,油囊直径较大,维管束数量较多,差异水平分别为显著 ($P=0.04071<0.05$)、极显著 ($P=0.00016<0.01$)、极显著 ($P=0.00000<0.01$)。而 GL-UG9 角质层和表皮细胞厚度均较 DH201-2 厚,差异达到了极显著水平 ($P_{\text{角质层厚度}}=0.00167$, $P_{\text{表皮细胞厚度}}=0.00000<0.01$)。

表 1 桉树无性系叶柄结构/ μm

Table 1 petiole structure of eucalyptus clones

桉树无性系 Clones	角质层厚度 Cutin layer	表皮细胞厚度 Epidermal cells	皮层薄壁 细胞厚度 Cortex parenchyma cells	油囊数量 Oil capsule number	油囊直径 Oil diameter capsule	维管束厚度 Vascular bundles thickness	维管束数量 Vascular bundle number
DH201-2	3.70 \pm 0.14**	10.82 \pm 0.51	19.03 \pm 1.53	8.00 \pm 0.29**	56.27 \pm 1.36	10.35 \pm 0.90	4.67 \pm 0.22
GL-UG9	2.33 \pm 0.11	12.70 \pm 0.36*	18.12 \pm 1.36	1.50 \pm 0.14	74.46 \pm 8.55	8.35 \pm 0.60	5.83 \pm 0.28**

* 为同一列差异显著; ** 为同一列差异极显著,置信区间 95%

表 2 桉树无性系茎结构/ μm

Table 2 Stem structure of eucalyptus clones

桉树无性系 Clones	角质层厚度 Cutin layer	表皮细胞厚度 Epidermal cells	皮层薄壁 细胞厚度 Cortex parenchyma cells	油囊数量 Oil capsule number	油囊直径 Oil capsule number	维管束厚度 Oil diameter capsule	维管束数量 Vascular bundles thickness
DH201-2	3.98 \pm 0.16	9.68 \pm 0.21	21.56 \pm 2.12*	5.50 \pm 0.14	58.44 \pm 2.33**	11.21 \pm 0.72	7.00 \pm 0.24**
GL-UG9	5.25 \pm 0.23**	15.76 \pm 0.49*	17.03 \pm 0.75	8.00 \pm 1.17	46.18 \pm 1.15	10.94 \pm 0.82	3.33 \pm 0.14

* 为同一列差异显著; ** 为同一列差异极显著,置信区间 95%

桉树枝瘿姬小蜂成虫在桉树嫩梢、叶柄、叶脉、茎等处产卵,导致叶片细小、叶柄肿大、丛枝状,但是试验的两个无性系中 GL-UG9 具有明显的抗幼虫定殖现象,人工接蜂没有发现形成虫瘿,仅见嫩梢叶片细小,未变形,而 DH201-2 受桉树枝瘿姬小蜂侵害后,组织结构高度分化,形成肿大的虫瘿。

桉树枝瘿姬小蜂卵孵化之后,受害部位开始肿大,幼虫发育初期仅在叶柄和茎等部位看到一个小的半球形凸起,较光亮其颜色与周围组织接近(图 3a)。虫瘿形成后,幼虫就生活在虫瘿里。若成虫密度较小,则仅在叶柄处形成小的虫瘿,叶脉偶尔见到愈伤组织;当成虫密度较大时,可在叶脉、茎等多处产卵,形成茎-叶柄-叶脉相连的虫瘿。随着虫瘿增大,叶脉和叶柄连接处扭曲的越严重,叶片也严重变形,叶片颜色大部分仍然保持绿色,少量颜色变黄或干枯,无脱落(图 3b)。解剖发现,每个虫瘿约有 10 个幼虫。成虫羽化后咬破瘿室周围组织,形成羽化孔,枝条干枯脱落,受害严重的植株羽化孔密布整个枝条,会出现整株死亡的现象(图 3c)。

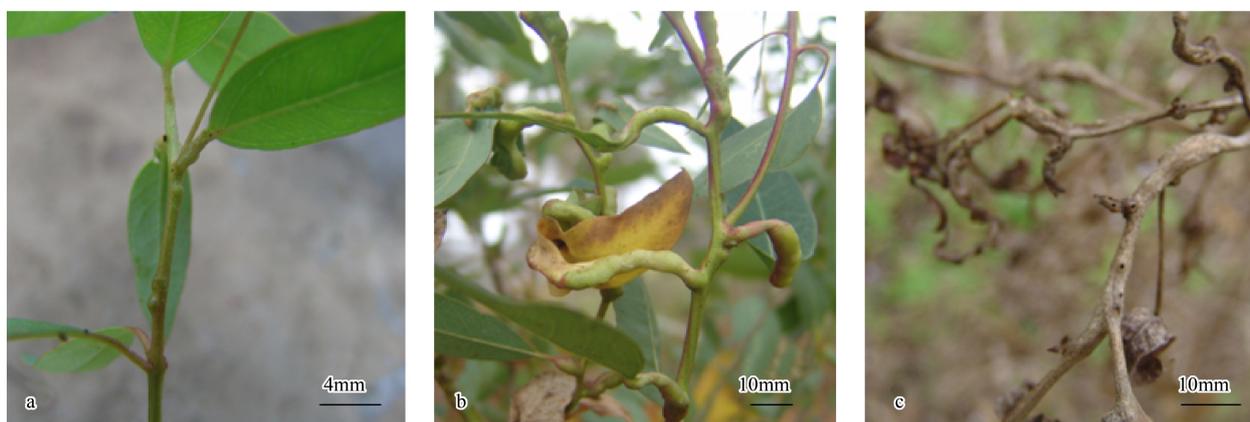


图 3 虫瘿外观

Fig. 3. Appearance of Gall

a. 虫瘿形成初期为害状; b. 形成茎-叶柄-叶脉连接虫瘿; c. 成虫羽化后干枯的虫瘿

通过测量大量叶柄虫瘿后得出,成熟虫瘿平均长度为(16.10 \pm 8.81)mm,直径约为(3.05 \pm 1.73)mm。

虫瘿形成初期,幼虫尚未形成,但是组织构造已经开始分化,植物正常的疏导系统被破坏,维管束层结构开始变形(图 4a)。随着卵的孵化,幼虫在植物维管束和皮层之间形成近似球形的空间(图 4b)。通过对桉树枝瘿姬小蜂虫瘿瘿室结构进一步放大可以看出,瘿室明显分为几层(图 4c),由内到外大致可以分为:营养组

组织层(21.84 ± 0.42) μm 、薄壁组织层(13.34 ± 0.19) μm 、厚壁组织层(18.68 ± 1.13) μm 、维管束层、皮层、表皮等结构,虫瘿的形成破坏了植物内部原有的组织结构,形成了许多以瘿室为中心的结构,瘿室半径约为(211.61 ± 5.12) μm ,而正常的植株组织结构是以髓或者初生木质部为中心的结构,但是这一结构与桉树的油囊不同(图 1,图 2)。瘿室内薄/厚壁组织层中间有一层晶体层,大小为 $7.92 \mu\text{m} \times 4.92 \mu\text{m}$,晶体无规则形状,无色光亮(图 4c)。

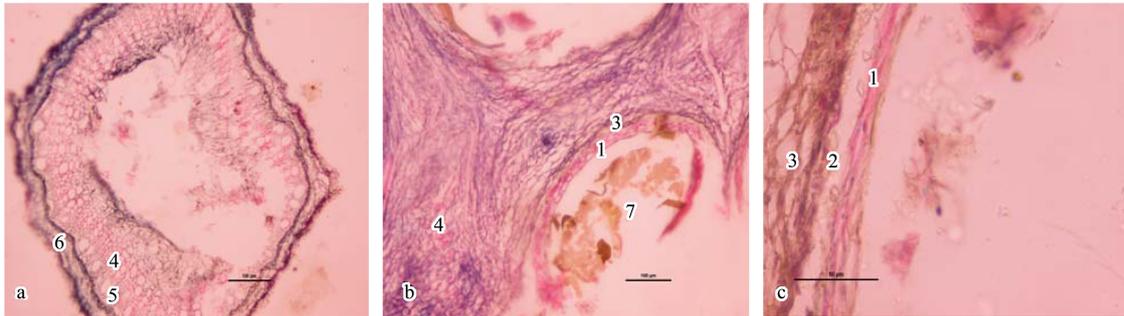


图 4 虫瘿解剖特征

Fig. 4 Anatomy of Gall

a. 维管束开始变形;b. 瘿室结构;c. 晶体层; 1. 营养组织层;2. 厚壁组织层(晶体层);3. 薄壁组织层;4. 维管束层;5. 皮层;6. 表皮;7. 瘿室

2.2 对桉树营养与次生物质的影响

DH201-2 和 GL-UG9 两个桉树无性系的营养物质以及 pH 值测定结果见表 3。在接种桉树枝瘿姬小蜂后,叶片可溶性总糖、游离氨基酸含量均升高,与健康植株比较差异均达到极显著水平($P_{\text{可溶性总糖DH201-2}} = 0.00000 < 0.01$, $P_{\text{可溶性总糖GL-UG9}} = 0.00006 < 0.01$, $P_{\text{游离氨基酸DH201-2}} = 0.00000 < 0.01$, $P_{\text{游离氨基酸GL-UG9}} = 0.00006 < 0.01$)。虽然,接虫后 DH201-2 叶片蛋白质含量、pH 值有所降低,与健康植株比较均未达到显著水平($P_{\text{蛋白质DH201-2}} = 1.00000 > 0.05$, $P_{\text{蛋白质GL-UG9}} = 0.19173 > 0.05$, $P_{\text{pH值DH201-2}} = 0.18350 > 0.05$, $P_{\text{pH值GL-UG9}} = 0.17489 > 0.05$)。

表 3 桉树 2 个无性系接种桉树枝瘿姬小蜂前后的营养物质以及 pH 值测定

Table 3 Changes in nutrient substances and pH value of eucalypt leaves subjected to biotic stress elicited by *Leptocybe invasa* Fisher & La Salle.

桉树无性系 Clones		可溶性总糖 Total sugar	蛋白质 Protein	游离氨基酸 Soluble free amino acids	pH
DH201-2	健康 Healthy	25.65±0.64	46.19±1.49	2.13±0.12	4.45±0.02
	接虫 Vaccination	29.69±0.24**	40.56±0.53	2.88±0.01**	4.34±0.03
GL-UG9	健康 Healthy	23.08±0.12	42.46±0.91	1.65±0.01	4.42±0.02
	接虫 Vaccination	24.18±0.06**	42.46±1.20	1.78±0.01**	4.37±0.02

同一无性系健康和接虫数据 * 表示差异显著注, ** 差异极显著

由表 4 可以看出,健康植株接种成虫后叶片缩合单宁、总酚含量升高,其中缩合单宁含量仅 GL-UG9 差异达到显著水平($P=0.02324 < 0.05$),总酚含量差异不显著。类黄酮仅 DH201-2 升高,但是差异均不显著。花色苷含量均降低,仅 DH201-2 差异达到极显著水平($P=0.03396 < 0.05$),GL-UG9 未达到显著水平。

表 4 桉树 2 个无性系接种桉树枝瘿姬小蜂前后酚类物质含量

Table 4 Changes in phenol contents of eucalypt leaves subjected to biotic stress elicited by *Leptocybe invasa* Fisher & La Salle

桉树无性系 Clones		缩合单宁 Tannins	类黄酮 Flavonoid	花色苷 Anthocyanin	总酚 Total phenols
DH201-2	健康 Healthy	11.68±0.75	18.048±0.181	0.103±0.002*	101.227±2.018
	接虫 Vaccination	12.35±0.45	20.195±1.280	0.061±0.006	104.862±0.977
GL-UG9	健康 Healthy	8.25±0.69	18.593±0.963	0.064±0.023	102.570±5.262
	接虫 Vaccination	15.54±2.66*	17.675±1.036	0.024±0.007	107.296±2.796

同一无性系健康和接虫数据 * 表示差异显著注, ** 差异极显著

2.3 对桉树体内酶活力的影响

由表 5 可以看出,受害后 2 个桉树无性系叶片吲哚乙酸氧化酶活力均比正常叶片高,且差异均达到极显著水平($P_{DH201-2}=0.00015<0.01$, $P_{GL-UG9}=0.00000<0.01$)。

表 5 桉树 2 个无性系接种桉树枝瘿姬小蜂前后的吲哚乙酸氧化酶活力

桉树无性系 Clones	DH201-2		GL-UG9	
	健康 Healthy	接虫 Vaccination	健康 Healthy	接虫 Vaccination
吲哚乙酸氧化酶 Indole acetic acid oxidase	17.94±0.09	18.60±0.18 **	17.82±0.01	18.71±0.22 **

同一无性系健康和接虫数据 * 表示差异显著注, ** 差异极显著

由表 6 可以看出,接种成虫后过氧化物酶活力升高,其中 DH201-2 接虫后过氧化物酶活力升高 3.5 倍,过氧化氢酶活力升高 1.9 倍, GL-UG9 接虫后过氧化物酶活力升高 1.3 倍,过氧化氢酶活力升高 1.1 倍。

表 6 桉树 2 个无性系接种桉树枝瘿姬小蜂前后过氧化物酶活力

桉树无性系 Clones	DH201-2		GL-UG9	
	健康 Healthy	接虫 Vaccination	健康 Healthy	接虫 Vaccination
过氧化物酶 Peroxide	2.60	9.20	2.00	2.60
过氧化氢酶 Hydrogen peroxide enzyme	36.40	69.40	109.60	124.60

2.4 叶绿素

由表 7 可以看出,接种桉树枝瘿姬小蜂后,两个无性系的叶绿素总量、叶绿素 a、b 含量均升高,且差异均达到极显著水平($P=0.00000<0.01$),其中 GL-UG9 叶绿素总量和 a 含量升高达到 1.3 倍。

表 7 桉树 2 个无性系接种桉树枝瘿姬小蜂前后的叶绿素含量

桉树无性系 Clones	健康 Healthy	叶绿素总量	叶绿素 a	叶绿素 b
		chlorophyll	Chlorophyll-a	Chlorophyll-b
DH201-2	健康 Healthy	0.0766±0.0001	0.0540±0.0000	0.0227±0.0001
	接虫 Vaccination	0.0958±0.0002 **	0.0676±0.0001 **	0.0282±0.0001 **
GL-UG9	健康 Healthy	0.0505±0.0002	0.0354±0.0001	0.0150±0.0002
	接虫 Vaccination	0.0658±0.0002 **	0.0467±0.0001 **	0.0191±0.0002 **

同一无性系健康和接虫数据 * 表示差异显著注, ** 差异极显著

3 讨论

3.1 虫瘿的特殊结构

本次试验测量的 2 个桉树无性系正常组织切片中,叶柄和茎的角质层厚度差异水平正好相反,表皮细胞厚度差异一致,即 DH201-2 较薄,虽然 DH201-2 叶柄维管束较 GL-UG9 厚,但是差异没有达到显著水平,而瘿室的形成主要位于维管束和皮层中间。所以,植物组织/器官结构的差异可能在一定程度上影响了成虫产卵和取食,但并不是形成瘿室的主要原因,其寄主内含物等指标的生理性变化以及虫害的长期适应进化可能是决定虫瘿结构形成的关键因素。

陈文能等通过研究 10 种虫瘿切片后发现,虫瘿的内部结构与正常组织/器官的结构存在明显区别,组织和结构的高度分化是虫瘿的主要特征之一^[29]。本次试验的解剖学研究结果表明,正常叶柄、茎的石蜡切片与虫瘿切片具有明显区别,虫瘿组织高度分化和增殖的结构特征与正常组织结构特征差别较大。瘿室的形成破坏了维管束的基本构造,形成了以瘿室为中心的结构。本次试验对受害的 GL-UG9 进行跟踪观察后未发现 GL-UG9 有虫瘿形成,所以未解剖到 GL-UG9 上的虫瘿结构,但是并不能排除随着适宜寄主的减少昆虫出现进

化或者林木抗性退化的可能。

3.2 影响植物抗性的因子

植物维管束韧皮部附近往往是造瘿昆虫形成瘿室的地方,这可能与它容易获取植物光合产物有关^[2],正常植物组织光合产物的含量通常明显区别于虫瘿,一般是糖、氨基酸等可溶性营养物质的含量低于虫瘿组织,而正常组织内的防御性次生代谢产物含量则高于虫瘿^[30-31]。本次试验测试结果发现,两个桉树无性系接种桉树枝瘿姬小蜂后,可溶性总糖、游离氨基酸的含量明显高于接种前,说明植物的光合产物在受到外桉树枝瘿姬小蜂成虫诱导刺激初期开始明显增加。但是蛋白质、pH 值以及次生物质的变化没有规律可循,部分指标未达到差异显著的水平。

由于生长素主要对幼嫩组织伸长和发育起作用,而在极性运输过程中,所在组织成熟后,不需要过多的生长素,要依靠增加吲哚乙酸氧化酶活力来失活过多的生长素,所以吲哚乙酸氧化酶活力的大小对调节吲哚乙酸的水平具有重要的作用^[32]。调查发现,桉树枝瘿姬小蜂成虫入侵,导致植株受害部位生长受阻,新的梢头嫩芽、嫩叶不断出现,测试结果发现受害植株吲哚乙酸氧化酶活力较正常植株高,说明植物开始通过调节吲哚乙酸氧化酶活力来控制梢头过多的生长素,但是由于桉树枝瘿姬小蜂种群数量大,桉树嫩梢不断出现,吲哚乙酸氧化酶仍然不能实现生长素的正常调节。

过氧化物酶和叶绿素能够参与多种生理活动,与植物抗逆性、耐药性有关^[33-35]。本次试验发现过氧化物酶和过氧化氢酶升高幅度较大,说明植物在受到成虫入侵后,产生了明显的防御反应。而接种桉树枝瘿姬小蜂成虫后,桉树叶片的叶绿素含量均明显升高,光合产物也随着升高。同时还发现,形成虫瘿的桉树无性系 DH201-2 叶绿素含量较 GL-UG9 高($P=0.00000<0.01$),且差异极显著,但是较高的叶绿素含量并没有使得其抗性增加,原因有待深入研究。

3.3 诱导的桉树响应机理

不同桉树无性系正常组织结构、内含物的差异,导致植物在受到桉树枝瘿姬小蜂产卵危害后,表现出不同的组成和生化抗性特征。首先是植物器官结构形态发生改变,也就是维管束层的变形,形成了以瘿室为中心的特殊结构,影响了植物光合产物的产生和营养物质的运输,尤其是可溶性总糖和游离氨基酸含量受到不同程度的影响,这些物质对于植物自身生长和昆虫发育都具有十分重要的作用。随着害虫不断入侵,植物体内各种次生物质、过氧化物酶活性增强,其防御反应也逐渐表现出来。根据对桉树枝瘿姬小蜂虫瘿结构形成差异和桉树生理指标变化的研究,为解释桉树虫瘿形成过程和桉树抗枝瘿姬小蜂机理的研究提供重要的理论依据,从而达到迅速有效选育抗桉树枝瘿姬小蜂桉树无性系的目的。

References:

- [1] Wang G Y, Wang Y P, Wu H. Gall and gall-former insects. Chinese Bulletin of Entomology, 2010, 47(2): 414-424.
- [2] Jia C F, Liu Z Q. The peculiar insect galls. Entomological Knowledge, 2004, 41(6): 603-606.
- [3] Yang M M. Plants dance with Insects. Scientific Development, 2007, 409: 28-33.
- [4] Lin Q W, Xiao C, Zhang Z X. See Gall from Plants. China Nature, 2007, (3): 63-64.
- [5] Ma S M, Yu H, Li C C, Yang M Z. Plant gall biology. Chinese Bulletin of Entomology, 2008, 45(2): 330-335.
- [6] Liu Y M. Influences of leafiness pH made of Wulong tea. Journal of Tea Business, 1986, (1): 25-26.
- [7] Yu S W, Liu Y, Li Z G, Wu Y M, Yang H D. Relationship among Resistance of SO₂ and pH of leaf tissue in plant. Chinese Science Bulletin, 1980, (23): 1097-1098.
- [8] Wu Y J, Jiang X J, Li D W, Luo J T, Zhou G F, Chang M S, Yang Z Q. *Leptocybe invasa*, a new invasive forest pest making galls on twigs and leaves of eucalyptus trees in China (Hymenoptera: Eulophidae). Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(7): 161-163.
- [9] Mendel Z, Protasov A, Fisher N, La Salle J. Taxonomy and biology of *Leptocybe invasa* gen. & sp. n. (Hymenoptera: Eulophidae), an invasive gall inducer on *Eucalyptus*. Australian Journal of Entomology, 2004, 43(2): 101-113.
- [10] Xu J X, Ren H, Zhao D Y, Lin M S, Qiu H X, Zhong Z K, Chen M R, Huang M Y, Chen R P. Study on the population regularity and spatial distribution pattern of *Leptocybe invasa* at *Eucalyptus*. Guangdong Forestry Science and Technology, 2008, 24(6): 50-57.

- [11] Wu Y J, Xi F S, Luo J T, Li D W, Chang M S. Bionomics and control techniques of *Leptocybe invasa*. *Guangxi Plant Protection*, 2009, 22(2): 5-8.
- [12] Qian J, Luo X Y, Wu B. Occurrence and control *Leptocybe invasa* in Hainan Province. *Tropical Forestry*, 2009, 37(1): 40-41.
- [13] Wu Y J, Chang M S, Li D W, Luo J T, Qin Y L, Huang H Y, Ye J R. Effect of the damage of *Leptocybe invasa* Fisher & La Salle on condensed tannin contents of different eucalyptus clones. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2010, 3(6): 1-4.
- [14] Wu Y J, Chang M S, Li D W, Qin Y L, Sheng S. Response between Flavonoid and Anthocyanin content of eucalyptus and damage of *Leptocybe invasa* Fisher & La Salle. *Guangxi Forestry Science*, 2010, 39(3): 119-123.
- [15] Zhang Y S, Huang X, Chen Y F. *Plant Physiology Experiments Tutorial*. Beijing: Higher Education Press, 2009.
- [16] Khattab H, Khattab I. Responses of Eucalypt trees to the insect feeding (Gall forming Psyllid). *International Journal of Agriculture and Biology*, 2005, 7(6): 979-984.
- [17] Chen J X, Wang X F. *Plant Physiology Experimental Guidance*. 2nd ed. Guangzhou: South China University Of Technology Press, 2006.
- [18] Naguib M I. Colourimetric estimation of plant polysaccharides. *Zucker*, 1963, 16: 15-22.
- [19] Fairbairn N J. A modified anthrone reagent. *Chemistry and Industry*, 1953, 4: 285-313.
- [20] Lu Z L, Liu L W, Gong Y Q, Li X Y, Song L J, Yang J L, Wang L Z. Genetic analysis of dry matter weight and total soluble sugar contents in radish (*Raphanus sativus* L.). *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2009, 32(3): 25-29.
- [21] Liu P, Li M J. *Plant Physiology Experimental Technology*. Beijing: Science Press, 2009.
- [22] Sun P, Guo S P, Li H X. Relationship between tannin content of poplar and damage of *Saperda populnea*. *Journal of Northeast Forestry University*, 2008, 36(5): 51-52.
- [23] Yuan H E, Yan S C, Tong L L, Gao L L, Wang Y J. Content differences of condensed tannin in needles of *Larix gmelinii* by cutting needles and insect feeding. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3): 1415-1420.
- [24] Wu Y H, Zhong L J, Zhao X X. Relationship among total phenol, flavonoid and PPO activity with the necrosis of tobacco infected by PVY^N. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2007, 37(4): 398-402.
- [25] Li Y Z, Zheng Z L, Xie Z F. Relationship between chemicals in chestnut buds and chestnut gall wasp resistance. *Entomological Journal of East China*, 2006, 15(1): 13-16.
- [26] Yang Z D, Chang M S, Wei L X, Deng G Y, Lu Q E. Effect of Feeding by *Dappula tertia* and Pesticide Spraying on Some Physiological and Biochemical Indexes of *Eucalyptus urophylla* Seedlings. *Journal of Northeast Forestry University*, 2007, 35(7): 11-12.
- [27] Arnon D I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 1949, 24(1): 1-15.
- [28] Metzner H, Rau H, Senger H. Untersuchungen zur synchronisierbarkeit einzelner pigmentmangel-mutanten von *Chlorella*. *Planta*, 1965, 65(2): 186-194.
- [29] Chen W N. [D]. The biology and interaction between ambrosia galls and galling-insects, *Daphnephila* (Cecidomyiidae), on *Machilus* (Lauraceae) in Taiwan. Taizhong: National Chung Hsing University, 2009.
- [30] Hartley S E. The chemical composition of plant galls: are levels of nutrients and secondary compounds controlled by the gall-former? *Oecologia*, 1998, 113(4): 492-501.
- [31] Nyman T, Julkunen-Tiitto R. Manipulation of the phenolic chemistry of willows by gall-inducing sawflies. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 2000, 97(24): 13184-13187.
- [32] Li M, Huang Z L, Tan S M, Mo X Y, Lin H Q, Long T. Comparison on the activities and isoenzymes of polyphenol oxidase and indoleacetic acid oxidase of difficult-and easy-to-root *Eucalyptus* species. *Forest Research*, 2000, 13(5): 493-500.
- [33] Jiang X L, Li Z Z, Kang Z S. The recent progress of research on peroxidase in plant disease resistance. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry: Natural Science Edition*, 2001, 29(6): 124-129.
- [34] Liu C H, Luo Y Q, Chen G L, Chen Z L, Wang Z G, Zhang X F. Analysis of peroxidase isozyme of primary pests on Jujube in Northern Shanxi. *Forestry Science and Technology*, 2007, 32(3): 18-19.
- [35] Feng L Z. Relationship between chlorophyll contents and resistance to *Cylindrocladium quinqueseptatum* in eucalyptus. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University: Natural Science Edition*, 2008, 37(4): 365-368.

参考文献:

- [1] 王光钺, 王义平, 吴鸿. 虫瘿与致瘿昆虫. *昆虫知识*, 2010, 47(2): 414-424.
- [2] 贾春枫, 刘志琦. 奇特的虫瘿. *昆虫知识*, 2004, 41(6): 603-606.
- [3] 杨曼妙. 虫瘿, 昆虫与植物共舞. *科学发展*, 2007, 409: 28-33.
- [4] 林秦文, 肖翠, 张志翔. 从植物看虫瘿. *大自然*, 2007, (3): 63-64.

- [5] 马双敏, 虞泓, 李晨程, 杨明攀. 植物虫瘿. 昆虫知识, 2008, 45(2): 330-335.
- [6] 刘用敏. 浅析乌龙青茶做青叶 pH 值的影响. 茶叶通报, 1986, (1): 25-26.
- [7] 余叔文, 刘愚, 李振国, 吴有梅, 杨惠东. 植物对 SO₂ 的抗性与叶组织 pH 的相关性. 科学通报, 1980, (23): 1097-1098.
- [8] 吴耀军, 蒋学建, 李德伟, 罗基同, 周国福, 常明山, 杨忠岐. 我国发现 1 种重要的林业外来入侵害虫——桉树枝瘿姬小蜂(膜翅目: 姬小蜂科). 林业科学, 2009, 45(7): 161-163.
- [10] 徐家雄, 任辉, 赵丹阳, 林明生, 邱焕秀, 钟填奎, 陈沐荣, 黄木养, 陈瑞屏. 桉树枝瘿姬小蜂种群发生规律与空间分布格局研究. 广东林业科技, 2008, 24(6): 50-57.
- [11] 吴耀军, 奚福生, 罗基同, 李德伟, 常明山. 桉树枝瘿姬小蜂生物学特性及控制技术. 广西植保, 2009, 22(2): 5-8.
- [12] 钱军, 罗湘粤, 吴彪. 桉树枝瘿姬小蜂在海南的发生与防治. 热带林业, 2009, 37(1): 40-41.
- [13] 吴耀军, 常明山, 李德伟, 罗基同, 秦元丽, 黄华艳, 叶建仁. 桉树枝瘿姬小蜂危害对桉树缩合单宁含量的影响. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2010, 3(6): 1-4.
- [14] 吴耀军, 常明山, 李德伟, 秦元丽, 盛双. 桉树枝瘿姬小蜂危害对桉树类黄酮、花色苷含量的影响. 广西林业科学, 2010, 39(3): 119-123.
- [15] 张以顺, 黄霞, 陈云凤. 植物生理学实验教程. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [17] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导(第二版). 广州: 华南理工大学出版社, 2006.
- [20] 路昭亮, 柳李旺, 龚义勤, 李小艳, 宋立君, 杨金兰, 汪隆植. 萝卜干物重和可溶性总糖含量的遗传分析. 南京农业大学学报, 2009, 32(3): 25-29.
- [21] 刘萍, 李明军. 植物生理学实验技术. 北京: 科学出版社, 2009.
- [22] 孙萍, 郭树平, 李海霞. 杨树单宁含量与青杨天牛危害的关系. 东北林业大学学报, 2008, 36(5): 51-52.
- [23] 袁红娥, 严善春, 佟丽丽, 高璐璐, 王艳军. 剪叶损伤与昆虫取食对兴安落叶松 (*Larix gmelinii*) 针叶中缩合单宁诱导作用的差异. 生态学报, 2009, 29(3): 1415-1420.
- [24] 吴元华, 钟丽娟, 赵秀香. 烟草感染 PVYN 后叶脉坏死与总酚、类黄酮及 PPO 关系研究. 植物病理学报, 2007, 37(4): 398-402.
- [25] 李奕震, 郑柱龙, 谢治芳. 板栗芽内化学物质与抗栗瘿蜂的关系. 华东昆虫学报, 2006, 15(1): 13-16.
- [26] 杨振德, 常明山, 韦立秀, 邓桂英, 卢秋娥. 黛袋蛾取食及喷施农药对尾叶桉幼苗某些生理生化指标的影响. 东北林业大学学报, 2007, 35(7): 11-12.
- [29] 陈文能. 台湾樟科桉楠属植物营养瘿与瘿蚧科 (*Daphnephila*) 造瘿昆虫之生物学及交互作用 [D]. 台中: 国立中兴大学昆虫学研究所, 2009.
- [32] 李明, 黄卓烈, 谭绍满, 莫晓勇, 林海球, 龙腾. 难易生根桉树多酚氧化酶、吲哚乙酸氧化酶活性及其同工酶的比较研究. 林业科学研究, 2000, 13(5): 493-500.
- [33] 蒋选利, 李振岐, 康振生. 过氧化物酶与植物抗病性研究进展. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2001, 29(6): 124-129.
- [34] 刘长海, 骆有庆, 陈国梁, 陈宗礼, 王志刚, 张新锋. 陕北枣树主要害虫过氧化物酶同工酶的分析. 林业科技, 2007, 32(3): 18-19.
- [35] 冯丽贞. 桉树叶绿素含量与焦枯病抗性的关系. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2008, 37(4): 365-368.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 23 December, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Maternal thermoregulation during gestation affects the phenotype of hatchling Chinese skinks (*Eumeces chinensis*): testing the maternal manipulation hypothesis LI Hong, ZHOU Zongshi, WU Yanqing, et al (7255)

Effects of conspecific and interspecific interference competitions on cache site selection of Siberian chipmunks (*Tamias sibiricus*) SHEN Zhen, DONG Zhong, CAO Lingli, et al (7264)

Characterization of ammonia volatilization from polluted river under aeration conditions: a simulation study LIU Bo, WANG Wenlin, LING Fen, et al (7270)

Diurnal activity patterns and environmental factors on behaviors of Bar-headed Geese *Anser indicus* wintering at Caohai Lake of Guizhou, China YANG Yanfeng, ZHANG Guogang, LU Jun, et al (7280)

Impacts of snow cover change on soil water-heat processes of swamp and meadow in Permafrost Region, Qinghai-Tibetan Plateau CHANG Juan, WANG Gengxu, GAO Yongheng, et al (7289)

Spatial-temporal changes of urban patch wetlands in Changsha, China GONG Yingbi, JING Lei, PENG Lei, et al (7302)

Modeling of carbon and water fluxes of Qianyanzhou subtropical coniferous plantation using model-data fusion approach REN Xiaoli, HE Honglin, LIU Min, et al (7313)

Ecological compensation standard for controlling nitrogen non-point pollution from farmland: a case study of Yixing City in Jiang Su Province ZHANG Yin, ZHOU Yuchen, SUN Hua (7327)

Static toxicity evaluation of chemical wastewater by PFU microbial communities method LI Zhaoxia, ZHANG Yuguo, LIANG Huixing (7336)

Emergy evaluation of an agro-circulation system in Beijing suburb: take Jianyan village as a case study ZHOU Liandi, HU Yanxia, WANG Yazhi, et al (7346)

Research on the cooling effect of Xi'an parks in summer based on remote sensing FENG Xiaogang, SHI Hui (7355)

The dynamics of spatial and temporal changes to forested land and key factors driving change on Hainan Island WANG Shudong, OUYANG Zhiyun, ZHANG Cuiping, et al (7364)

Impact of different sowing dates on green water footprint of maize in western Jilin Province QIN Lijie, JIN Yinghua, DUAN Peili (7375)

The dynamic variation of maize (*Setaria mays* L.) population growth characteristics under cultivars-intercropped on the Loess Plateau WANG Xiaolin, ZHANG Suiqi, WANG Shuqing, et al (7383)

Effect of different planting methods on root-shoot characteristics and grain yield of summer maize under high densities LI Zongxin, CHEN Yuanquan, WANG Qingcheng, et al (7391)

Heavy metal contaminant in development process of artificial biological Soil Crusts in sand-land XU Jie, AO Yanqing, ZHANG Jingxia, et al (7402)

Effects of enhanced UV-B radiation and nitrogen on photosynthetic pigments and non-enzymatic protection system in leaves of foxtail millet (*Setaria italica* (L.) Beauv.) FANG Xing, ZHONG Zhangcheng (7411)

Photosynthetic response of different ecotype of *Illicium lanceolatum* seedlings to drought stress and rewatering CAO Yonghui, ZHOU Benzhi, CHEN Shuanglin, et al (7421)

Seasonal variations in the stems of *Larix principis-rupprechtii* at the treeline of the Luya Mountains DONG Manyu, JIANG Yuan, WANG Mingchang, et al (7430)

Influence of terrain on plant biomass estimates by remote sensing: a case study of Guangzhou City, China SONG Weiwei, GUAN Dongsheng, WANG Gang (7440)

Effects of exponential fertilization on biomass allocation and root morphology of *Catalpa bungei* clones WANG Lipeng, YAN Ziyi, LI Jiyue, et al (7452)

Effects of fire damages on *Larix gmelinii* radial growth at Tahe in Daxing'an Mountains, China WANG Xiaochun, LU Yongxian (7463)

A model for water consumption by mountain jujube pear-like XIN Xiaogui, WU Pute, WANG Youke, et al (7473)

Specificity of photosystems function change of two kinds of overwintering broadleaf evergreen plants ZHONG Chuanfei, ZHANG Yuntao, WU Xiaoying, et al (7483)

- Effects of drought on fluorescence characteristics of photosystem II in leaves of *Ginkgo biloba* WEI Xiaodong, CHEN Guoxiang, SHI Dawei, et al (7492)
- Numerical classification and ordination of forest communities in habitat of Sichuan Snub-nosed Monkey in Hubei Shennongjia National Nature Reserve LI Guangliang, CONG Jing, LU Hui, et al (7501)
- Impact of inorganic anions on the cadmium effective fraction in soil and its phytoavailability during salinization in alkaline soils WANG Zuwei, YI Liangpeng, GAO Wenyan, et al (7512)
- Photosynthetic adaptability of the resistance ability to weak light of 2 species *Spiraea* L. LIU Huimin, MA Yanli, WANG Baichen, et al (7519)
- Fine root longevity and controlling factors in a *Phoebe Bournei* plantation ZHENG Jinxing, HUANG Jinxue, WANG Zhenzhen, et al (7532)
- Analysis on spatial structure and scenarios of carbon dioxide emissions from tourism transportation XIAO Xiao, ZHANG Jie, LU Junyu, et al (7540)
- The hydrological response to human activities in Guishui River Basin, Beijing LIU Yuming, ZHANG Jing, WU Pengfei, et al (7549)
- Socio-economic impacts of under-film drip irrigation technology and sustainable assessment: a case in the Manas River Basin, Xinjiang, China FAN Wenbo, WU Pute, MA Fengmei (7559)
- Effects of pattern and timing of high temperature exposure on the mortality and fecundity of *Aphis gossypii* Glover on cotton GAO Guizhen, LÜ Zhaozhi, XIA Deping, et al (7568)
- Physiological responses of *Eucalyptus* trees to infestation of *Leptocybe invasa* Fisher & La Salle WU Yaojun, CHANG Mingshan, SHENG Shuang, et al (7576)
- Carbon storage capacity of a *Betula alnoides* stand and a mixed *Betula alnoides* × *Castanopsis hystrix* stand in Southern Subtropical China: a comparison study HE Youjun, QIN Lin, LI Zhiyong, et al (7586)
- Distribution and ecological risk assessment of 7 heavy metals in urban forest soils in Changsha City FANG Xi, TANG Zhijuan, TIAN Dalun, et al (7595)
- Review and Monograph**
- The relationship between humans and the environment at the urban-rural interface: research progress and prospects HUANG Baorong, ZHANG Huizhi (7607)
- Flux footprint of carbon dioxide and vapor exchange over the terrestrial ecosystem: a review ZHANG Hui, SHEN Shuanghe, WEN Xuefa, et al (7622)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 23 期 (2012 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 23 (December, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071 电话:(010)64034563 E-mail: journal@espg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@espg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元