

大叶黄杨窄吉丁的鉴定及生物学特性研究*

张旭东^{1**} 任利利^{1***} 宋海天² 葛思勋¹ 付宁宁¹ 骆有庆¹

(1. 北京林业大学林木有害生物防治北京市重点实验室, 北京 100083;

2. 福建省林业科学研究院、国家林业和草原局南方山地用材林培育重点实验室, 福州 350012)

摘要 【目的】本文研究并描述危害大叶黄杨(冬青卫矛) *Euonymus japonicus* Thunb 的钻蛀性害虫大叶黄杨窄吉丁 *Agrilus euonymi* Tôyama, 1985 各虫态的形态特征及危害特性, 并观察其虫道三维结构, 以期为大叶黄杨窄吉丁的发生监测及防控提供依据。【方法】查阅国内外相关文献, 将大叶黄杨窄吉丁学名的变化过程进行记述整理, 详细描述幼虫、蛹、成虫的形态特征; 观察大叶黄杨窄吉丁危害的各个指标特征, 包括虫口密度、坑道特征、羽化孔特征和蛹室特征等, 明确了完整虫道的发生规律。利用分子生物学方法对大叶黄杨窄吉丁进行鉴定, 提取其基因组 DNA, 使用鞘翅目通用引物扩增线粒体细胞色素氧化酶亚基 I (CO I) 序列并测序, 在 NCBI 数据库进行序列比对, 并构建系统发育树。基于对受害木段进行多角度, 全方位的拍摄, 首次在虫害木解析中使用 Image-based-Rendering(IBR) 技术对吉丁虫道三维模型进行重建。【结果】成虫形态特征完全符合大叶黄杨窄吉丁的描述, 基于 CO I 基因序列构建系统发育树 (Mrbayes 树) 显示, 采集到的吉丁与 2 个俄罗斯远东样本序列聚为一支, 结合文献, 进一步明确其为大叶黄杨窄吉丁。大叶黄杨窄吉丁主要危害树干韧皮部及木质部, 具向阳性; 在树皮钻蛀坑道, 无明显侵入孔; 蛹室米粒状, 位于木质部; 羽化孔“D”型; 坑道形状有一定规律, 可分为 S 型及其变型 2 种, 密集纵向迂回型。【结论】详细的形态特征描述、正确的学名厘定、基因序列分析信息, 有利于大叶黄杨窄吉丁的鉴定及学名的正确使用; 复原完整虫道信息便于在非成虫期结合寄主种类鉴定害虫种类、评估虫口密度和危害程度, 为大叶黄杨窄吉丁的监测提供了具体的判别方法, 为化学防治、生物防治等提供参考与技术支持。**关键词** 大叶黄杨窄吉丁; 形态特征; 危害特性; 学名厘定; 钻蛀性昆虫; 坑道重建

Identification and biological characteristics of *Agrilus euonymi* Tôyama, 1985

ZHANG Xun-Dong^{1**} REN Li-Li^{1***} SONG Hai-Tian² GE Si-Xun¹
FU Ning-Ning¹ LUO You-Qing¹

(1. Beijing Key Laboratory for Forest Pest Control, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of State Forestry and Grassland Administration on Timber Forest Breeding and Cultivation for Mountainous Areas in Southern China, Fuzhou 350012, China)

Abstract [Aim] To review the nomenclature and describe the morphological characteristics and larval galleries of *Agrilus euonymi* Tôyama, 1985, a buprestid beetle that damages *Euonymus japonicus* Thunb, and thereby provide guidance and suggestions for the monitoring and prevention of this pest. **[Methods]** A review of the relevant domestic and foreign literature was conducted to clarify changes to the scientific name of *A. euonymi*. Morphological characteristics of larvae, pupae, and adults were observed and described in detail. We analyzed the gallery characteristics of *A. euonymi*, including population density, gallery length and width, entrance hole, pupal chamber and emergence hole. To identify the species at the molecular level, DNA was extracted and the mitochondrial cytochrome oxidase subunit I (CO I) amplified and sequenced using

*资助项目 Supported projects: 北京市科技计划课题: “百万亩造林健康监测与有害生物绿色防控技术研究集成示范” (Z201100008020001); 国家自然科学基金项目 (31900354)

**第一作者 First author, E-mail: zhangxd@bjfu.edu.cn

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

收稿日期 Received: 2022-08-30; 接受日期 Accepted: 2023-10-15

general coleopteran primers. Sequences were compared with existing *Agrilus* sequences in the NCBI database and a phylogenetic tree of closely related species constructed. *A. euonymi* galleries were photographed from different angles, and reconstructed in three dimensions using Image-based-Rendering, a first for a buprestid beetle. **[Results]** Morphological characteristics of adults were completely consistent with the published description of *A. euonymi*. A Mrbayes tree based on CO I gene sequence variation showed that all samples clustered onto the same branch as two samples from the Russian Far East. Together with information from the literature, this confirmed that our samples were *A. euonymi*. *A. euonymi* mainly damages the phloem and xylem of the trunk and is active on the sunny side of host trees. *A. euonymi* bores galleries without entrance holes under the bark of host trees. The pupal chamber is shaped like a grain of rice and is in the xylem. The eclosion hole was 'D' shaped. Tunnels were of two types; the S-type and its variants and the dense longitudinal roundabout type. **[Conclusion]** Morphological characteristics, clarification of the correct scientific name and gene sequence analysis confirmed the identify of specimens as *A. euonymi*. A three-dimensional reconstruction of its larval gallery structure also helped with identification and assessing the damage to host trees. These findings provide technical guidance for the monitoring and control of this pest.

Key words *Agrilus euonymi*; morphological characteristics; damage features; scientific name clarifying revision; boring insect; gallery reconstruction

冬青卫矛 *Euonymus japonicus* Thunb 是卫矛科 Celastraceae 卫矛属 *Euonymus* 的常绿灌木, 适应性强, 分布与栽培范围广, 广泛使用于各种园林绿化建设中的绿篱树种, 具有很高的观赏与经济价值 (董丽, 2001; Spivey *et al.*, 2002)。作者通过观察发现, 该树种在北京多地点受一种吉丁危害并造成较多植株死亡。*Agrilus euonymi* 属于鞘翅目 Coleoptera 吉丁虫科 Buprestidae 窄吉丁属 *Agrilus*, 是冬青卫矛的一种重要蛀干害虫, 由 Tôyama 于 1985 年发表, 模式标本采集于日本东京市世田谷区 (Tôyama, 1985; Jendek and Grebennikov, 2011)。其异名为: *Agrilus yagii* Tôyama, 1985 (Tôyama, 1985; Jendek and Grebennikov, 2011)。

冬青卫矛俗名大叶黄杨, 我国早期文献多描述危害该树种的窄吉丁为黄杨窄吉丁 (或黄杨小吉丁), 如: 1981 年我国首次记载了窄吉丁虫

Agrilus sp. 危害南京的冬青卫矛 (荆贵兰和程沪, 1981), 之后惠彦文 (1998) 讨论其学名为 *Agrilus nakanei* Kurosawa, 而该学名现已作为 *Agrilus yamabusi* 的异名, 在寄主植物和形态学描述方面与其描述差异较大, 本文认为早期鉴定存在错误。之后陕西 (刘建功等, 2016), 河南 (赵彦征和赵艳玲, 2017) 也以中文名“大叶黄杨窄吉丁”报道了发生在冬青卫矛上的窄吉丁类为害。

该虫成虫喜光, 白天活动, 从 6:00 左右到 18:00 为活动时间, 有假死性 (惠彦文, 1998), 其余虫态均隐蔽生活。幼虫在孵化后直接破孔钻入皮层蛀食, 危害韧皮部及木质部边材 (刘建功, 2016; 赵彦征和赵艳玲, 2017)。该吉丁危害严重, 大面积发生可在短期内造成绿化带中冬青卫矛成片失绿干枯死亡 (图 1), 严重破坏城市绿化, 造成经济损失, 影响城市景观。



图 1 绿化带被害症状

Fig. 1 The damage features of *Agrilus euonymi* in the greenbelt

通过观察大叶黄杨窄吉丁的形态学特征,并对北京海淀区发生危害冬青卫矛的窄吉丁进行了基于 CO I 序列分子学鉴定,确定其为大叶黄杨窄吉丁 *A. euonymi*; 观察了大叶黄杨窄吉丁的蛀道、蛹室、羽化孔特征,并利用其虫道系统进行建模,以期为进一步监测与防控该害虫提供了依据,为类似钻蛀性害虫的快速鉴定及针对性防控提供思路。

1 材料与方法

1.1 野外调查

选择北京海淀区林大北路伯儒苑社区内的冬青卫矛作为实验材料,于 2021 年 6 月,采集受害木截段(每段长 0.4-0.7 m)。在 6-8 月份,采集不同受害阶段的受害木树叶,使用 Nikon D810 (Nikon, 日本)相机拍摄叶片褪色变化图。同时选取处于受害初期冬青卫矛,拍摄时序性照片,探究叶片变化规律。另外,选择北京海淀区林大北路伯儒苑的冬青卫矛用于野外活立木的观察研究,包括危害症状,虫口密度及虫道各指标的观察记录。

1.2 虫源采集及观察

虫害木段放置在网笼中饲养,每日上午 9:00 收集羽化的成虫;随机挑选木段解析,收集吉丁的幼虫及蛹;收集到的各虫态样本存储于 75% 的酒精中。使用 ZEISS AXIO Zoom.V16 (ZEISS, 德国)体式显微镜观察、拍照并记录吉丁的幼虫,蛹,成虫的形态特征;借助 ZEISS AXIO Zoom.V16 体式显微镜测量成虫的体长、头宽及前胸背板长度、幼虫及蛹的长度。

1.3 分子鉴定

随机选取 8 头吉丁虫,分别提取单头吉丁的基因组 DNA,用于分子鉴定。

1.3.1 DNA 提取 使用微量 DNA 提取试剂盒 AxyPrep Multisource Genomic DNA Miniprep Kit (Axygen, 美国),按说明书步骤提取样品 DNA;使用超微量紫外线分光光度计 NanoDrop 2000 (Thermo Fisher Scientific Inc., 美国)检测样品 DNA 浓度。

1.3.2 PCR 扩增 以 1.3.1 的方法提取的 DNA 为模板,扩增线粒体 CO I 基因片段。引物使用鞘翅目通用引物 LCO1490 (序列: 5'-GGTCAACAAATCATAAAGATATTGG-3'; 碱基数 31) 和 HCO2198 (序列: 5'-TAAACTTCAGGGTGACCAAAAAATCA-3') (Kelmarova *et al.*, 2019)。PCR 扩增体系为: 2×Es Taq MasterMix (CWBIO, CW0690M) 20 μL, 正向引物 1 μL, 反向引物 1 μL, DNA 模板 1 μL 和超纯水 17 μL 共 40 μL。PCR 反应程序为: 95 °C 预变性 3 min; 95 °C 变性 1 min, 50 °C 退火 1 min, 72 °C 延伸 1 min 30 s, 共进行 35 次循环; 72 °C 延伸 7 min; 4 °C 保存。

1.3.3 PCR 扩增产物测序 PCR 扩增完成的产物送北京睿博兴科生物技术有限公司进行双向测序。

1.3.4 序列比对 拼接后的样本序列进行了 Blast (NCBI) 比对,使用 Blastn、Standard database、High similar sequences (Mega blast 程序)。

1.3.5 基于 CO I 序列构建系统发育树 下载 NCBI 数据库中 *A. euonymi* CO I 序列 MF805361、MF805206 (Russia Primorsky Krai 采集), 下载 NCBI 数据库中相关序列 (表 1),

表 1 相关建树序列信息

Table 1 Sequence information used in tree construction

NCBI 登录号 NCBI accession no.	物种学名 Species	采集地 Location
KJ700321	松丽叩甲 <i>Campsosternus auratus</i>	中国台湾 Taiwan, China
KJ700322	松丽叩甲 <i>Campsosternus auratus</i>	中国台湾 Taiwan, China
LC619066	日本松吉丁 <i>Chalcophora japonica</i>	日本茨城 Ibaraki, Japan
MF286239	藤枝窄吉丁 <i>Agrilus yamawakii</i>	日本鬼怒川 Kinugawa, Japan
MF286303	<i>Agrilus viridicaerulans</i>	德国考布 Kaub, Germany

续表 1 (Table 1 continued)

NCBI 登录号 NCBI accession no.	物种学名 Species	采集地 Location
MF805210	乌苏里窄吉丁 <i>Agrilus ussuricola</i>	俄罗斯远东 Far East, Russia
MF805223	尖尾窄吉丁 <i>Agrilus tempestivus</i>	俄罗斯远东 Far East, Russia
MF805225	尖尾窄吉丁 <i>Agrilus tempestivus</i>	俄罗斯远东 Far East, Russia
MF805321	尖尾窄吉丁 <i>Agrilus tempestivus</i>	俄罗斯远东 Far East, Russia
MF805349	尖尾窄吉丁 <i>Agrilus tempestivus</i>	俄罗斯远东 Far East, Russia
KT250486	<i>Agrilus sulcicollis</i>	加拿大安大略 Ontario, Canada
MF286288	<i>Agrilus sulcicollis</i>	斯洛伐克布拉迪斯拉发 Bratislava, Slovakia
MF805309	翠翅窄吉丁 <i>Agrilus smaragdinus</i>	俄罗斯远东 Far East, Russia
MF805199	中华窄吉丁 <i>Agrilus sinensis</i>	中国湖北 Hubei, China
MF286254	<i>Agrilus salicivola</i>	日本关东 Kanto, Japan
HM417697	<i>Agrilus roscidus</i>	西班牙维加斯 Vegas, Spain
KT250477	<i>Agrilus ribesi</i>	俄罗斯伊凡诺沃 Ivanovo, Russia
MF805157	比伯窄吉丁 <i>Agrilus ribbei</i>	俄罗斯远东 Far East, Russia
MF805255	方平窄吉丁 <i>Agrilus quadrisignatus</i>	俄罗斯远东 Far East, Russia
KT250508	白蜡窄吉丁 <i>Agrilus planipennis</i>	加拿大安大略省 Ontario, Canada
MF805330	金翅窄吉丁 <i>Agrilus peregrinus</i>	俄罗斯远东 Far East, Russia
MF805283	北京窄吉丁 <i>Agrilus pekinensis</i>	俄罗斯远东 Far East, Russia
MF286287	<i>Agrilus olivicolor</i>	斯洛伐克布拉迪斯拉发 Bratislava, Slovakia
MF286285	<i>Agrilus obscuricollis</i>	斯洛伐克圣乔治 Svätý, Slovakia
MF805247	日本窄吉丁 <i>Agrilus nipponigena</i>	中国湖北 Hubei, China
MF805357	<i>Agrilus nagaoi</i>	越南高平 Cao Bang, Vietnam
MF286283	<i>Agrilus laticornis</i>	斯洛伐克莱维采 Levice, Slovakia
MF286240	<i>Agrilus kubani</i>	斯洛伐克圣乔治 Svätý, Slovakia
MF805236	宽顶窄吉丁 <i>Agrilus kaluganus</i>	俄罗斯远东 Far East, Russia
HM417711	<i>Agrilus hastulifer</i>	法国图卢兹 Toulouse, France
MF286281	<i>Agrilus hastulifer</i>	斯洛伐克圣乔治 Svätý, Slovakia
MF805218	<i>Agrilus graminis</i>	斯洛伐克布拉迪斯拉发 Bratislava, Slovakia
MF805232	弗莱氏窄吉丁 <i>Agrilus friebi</i>	俄罗斯远东 Far East, Russia
MF805206	大叶黄杨窄吉丁 <i>Agrilus euonymi</i>	俄罗斯远东 Far East, Russia
MF805361	大叶黄杨窄吉丁 <i>Agrilus euonymi</i>	俄罗斯远东 Far East, Russia
MF805364	平头窄吉丁 <i>Agrilus ecarinatus</i>	俄罗斯远东 Far East, Russia
MF805146	深蓝窄吉丁 <i>Agrilus cyanescens</i>	俄罗斯远东 Far East, Russia
HM417669	栎窄吉丁 <i>Agrilus cyaneoniger</i>	中国湖北 Hubei, China
HM417698	<i>Agrilus curtulus</i>	西班牙维加斯 Vegas, Spain
MF286244	<i>Agrilus auricollis</i>	匈牙利格德勒 Godollo, Hungary
MF805347	亚东窄吉丁 <i>Agrilus asiaticus</i>	中国湖北 Hubei, China
MF805311	<i>Agrilus angustulus</i>	希腊伊庇鲁斯 Epirus, Greece
MF805140	黑蓝窄吉丁 <i>Agrilus adelphinus</i>	俄罗斯远东 Far East, Russia

使用 *Campsosternus auratus* (KJ700321、KJ700322)、*Chalcophora japonica* (LC619066) 作为外群, 除去前后冗余碱基序列, 所得大叶黄杨窄吉丁 CO I 序列长度为 633 bp, 使用 PhyloSuite (Zhang *et al.*, 2020) 及相关插件程序构建系统发育树, 进化树文件通过 iTOL (<https://itol.embl.de>) 美化。

1.4 虫害木解析

在饲养的虫害木中, 挑选虫口密度相对较高的数节木段对其进行细致解析, 测定虫道系统的各向量指标。根据不同羽化孔密度将野外活立木划分为严重受害和轻微受害 2 个等级, 对比不同虫口密度下, 坑道分布及形态特征。

1.4.1 虫口密度统计 树干表面积 (S) 公式为: $S = d \times \pi \times L$, 其中 d = 木段直径; L = 木段长度。根据该公式计算虫口密度。统计单位面积内的羽化孔数。室内木段随机选取 6 段木段, 统计羽化孔数量; 室外活立木在距离地面 0-1.5 m 随机选取 20 cm 长木段 20 段进行计数统计。

1.4.2 虫道危害研究 将野外不同受害等级的受害木伐下, 选择不同等级的树干进行剥皮处理, 每个等级选取 20 个完整虫道, 测量并记录

其蛀道长度, 蛀道形状, 蛀食方向, 蛀食位置。

蛹室特征研究中, 随机选取 200 个蛹室, 测量并记录其分布位置, 方向, 长度和宽度。

羽化孔特征研究中, 将野外活立木上羽化孔周围的树干伐下后进行剥皮处理, 随机选择 30 个完整虫道, 测量水平及垂直方向上的危害长度。室内虫害木解析中, 随机选择 20 个完整虫道, 测量其蛀道长度, 观察统计侵入孔形状特点, 并用电子游标卡尺测量其孔径大小。

1.5 虫道系统复原及重建

虫道系统复原、重建中, 由于坑道蛀食较浅, 去除树皮后清晰可见, 故将受害木段进行剥皮处理。后选择一段拥有清晰完整坑道受害木段, 使用 Nikon D810 型号相机对受害木段进行多角度, 全方位的拍摄, 拍摄后将图像进行预处理, 保留受害木段信息。将预处理后的图片导入 RealityCapture 软件 (Epic Games, 美国) 进行处理建模。首先将图片进行对齐处理, 而后生成点云数据; 选择建模范围, 进行精细化纹理模型构建, 得到木段纹理结构; 后对模型进行贴图计算, 最终完成建模 (图 2)。

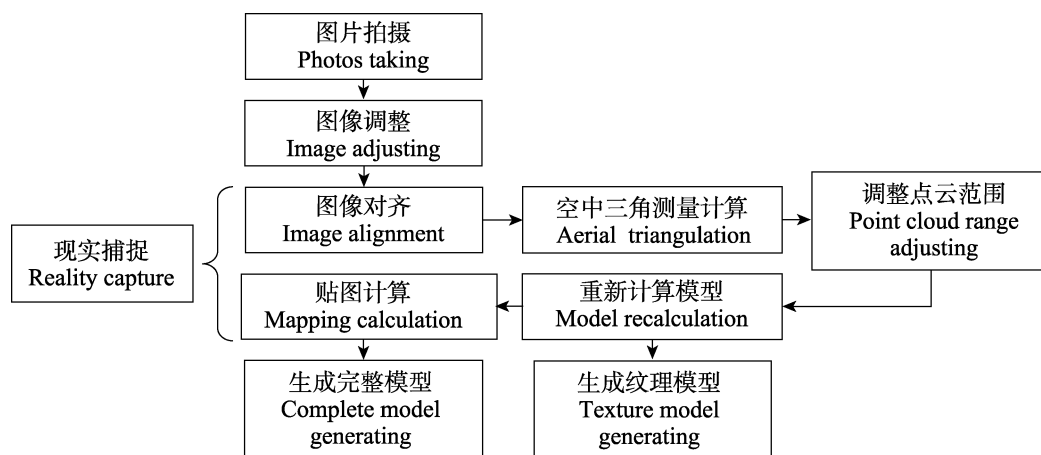


图 2 IBR 技术三维重建技术路线
Fig. 2 IBR 3D reconstruction technology route

2 结果与分析

2.1 危害症状

冬青卫矛受吉丁危害后, 树势明显衰弱, 树

叶褪色青枯。枝干被蛀食后可见树皮明显凹凸不平, 颜色不均匀, 枝干生长畸形 (图 3: A); 严重受害处树皮块状开裂, 剥落 (图 3: B, C)。吉丁的蛀食严重危害树干的输导组织, 导致被害枝上的叶片快速干枯、失绿 (图 4)。当枝干处

虫口密度较高时, 吉丁上下迂回钻蛀, 虫道密布, 几乎将枝干环剥, 导致树势迅速衰弱, 受害枝在发现被害后, 最快在不足两周内完全褪色枯死 (图 4)。



图 3 冬青卫矛枝干受害状

Fig. 3 The damage features of *Agrilus euonymi* on the trunk of *Euonymus japonicus*

A. 枝干受害后变形; B, C. 枝干严重受害后, 树皮开裂, 剥落。

A. Victimization of trunk; B, C. Bark cracking and peeling.



图 4 绿化带中冬青卫矛受害变化图

Fig. 4 The change process of damages to *Euonymus japonicus*

A. 植株第 1 天开始变色; B. 第 7 天枯黄; C. 第 12 天完全枯黄。

A. The plant began to change color on the 1st day; B. Withered and yellowed on the 7th day; C. Completely withered and yellowed on the 12th day.

2.2 形态特征

幼虫: 初孵幼虫体色乳白色, 老熟时常淡黄色; 老熟幼虫体长 10-14 mm ($n=7$) (图 5: A)。头小, 缩入前胸背板中, 深褐色; 前胸膨大显著, 向中后方渐狭, 前胸背面具明显的褐色中缝 (图 5: B); 腹部 10 节, 分节明显, 前 8 节侧面着生成有对气门, 前 7 节近圆形, 后 3 节略短, 末节端部具一对深褐色尾钳, 尾钳内侧呈锯齿状 (图 5: C)。

蛹: 蛹为裸蛹, 初为乳白色 (图 6: A),

逐渐变为黄色, 蛹体颜色随着逐渐发育不断加深, 羽化前为蓝黑色, 逐渐产生金属光泽 (图 6: B)。

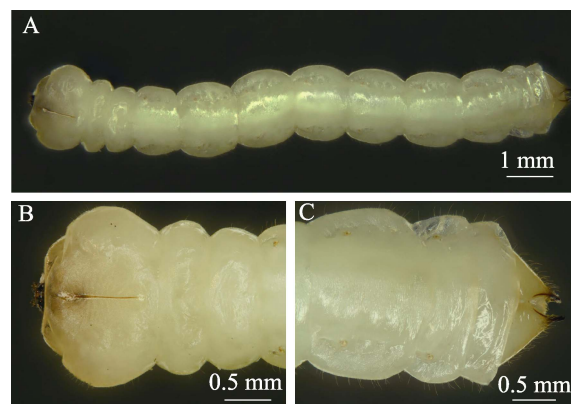


图 5 幼虫特征图片

Fig. 5 The morphological characteristics of *Agrilus euonymi* larvae

A. 幼虫整体; B. 头部及前胸背板; C. 腹部末端。
A. Overall view of larva; B. Head and pronotum; C. Terminal abdomen.



图 6 不同时期蛹的形态

Fig. 6 The morphological characteristics of the pupae at different stages

A. 发育中期的蛹; B. 即将羽化的蛹。

A. Pupa in mid-development stage; B. Pupa in later stage.

成虫: 成虫体小型, 体长 5-8 mm, 体近楔形; 前胸背板黑褐色, 鞘翅基部 2/3 褐色, 端部 1/3 黑色, 体表具金属光泽。头宽 1-1.5 mm, 复眼大, 肾形, 触角短, 11 节, 锯齿状 (图 7: A-C)。雌雄头顶及颜面具一定颜色差异, 雄性多蓝色, 雌性多为黄绿色 (图 7: E, F)。头部常有成列的浅皱与刻点, 刻点延皱纹密布, 头中部纵沟完整, 头顶略呈横向凹陷, 两侧具斜纹,

颜面上方近圆形区域光裸,近喙处及唇基密布灰色长绒毛。前胸背板近方形,宽大于长,长宽比约为 $2/3$,中部最宽,前缘凸起呈双弧状,前胸背板前端轻微隆起,肩前脊完整,平直略呈弓形,与前胸长度之比约为 $1/2$,近基部强烈隆突,侧隆突空隙略窄,向后交汇于一点,最窄点远离前胸背板后角,后缘双曲状,后角尖,中叶后突平截,两侧与后角形成两个弓形凹陷。小盾片发达,

前端倾斜入前胸,呈倒三角状,两侧内凹。鞘翅长宽比约为 $1:3$,前 $2/3$ 鞘翅两侧缘内凹呈弧状,最宽处位于端部 $1/3$ 处,后向内收窄,翅顶平截,具缘齿,翅缝端部相接成一突出钝角;鞘翅表面密被绒毛,具细密刻点,跗节 4 节,爪双裂。腹面黑褐色,密布不规则刻点与灰白细绒毛(图 7: A)。阳茎骨化强烈,略呈梭形,略弯曲,中叶前端呈指状突起(图 7: G-I)。

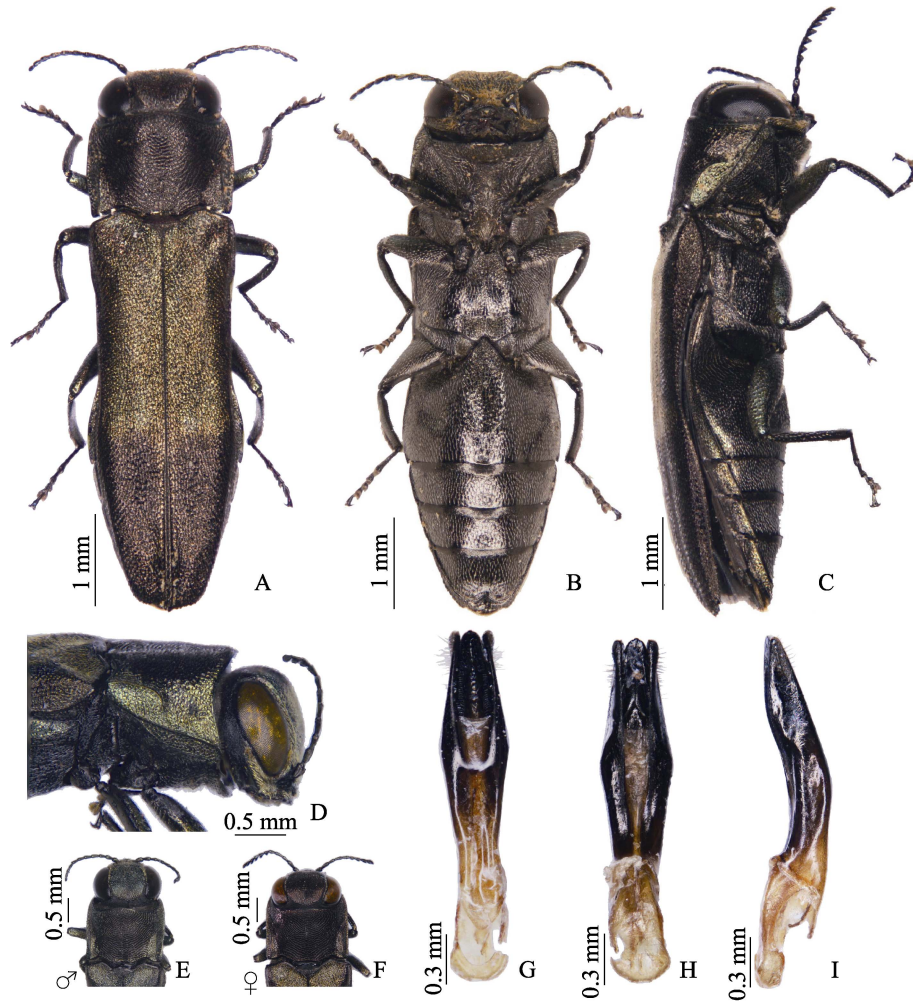


图 7 大叶黄杨窄吉丁成虫及其雄性生殖器照

Fig. 7 Adults and the aedeagus of male *Agrilus euonymi*

A. 成虫背面; B. 成虫腹面; C. 成虫侧面; D. 成虫肩前隆脊; E. 雄性成虫头部及前胸背板;

F. 雌性成虫头部及前胸背板; G. 阳茎背面; H. 阳茎腹面; I. 阳茎侧面。

A. Dorsal view of the adult; B. Ventral view of the adult; C. Lateral view of the adult; D. Prehumeral carina of the adult;

E. Head and pronotum view of the male adult; F. Head and pronotum view of the female adult; G. Ventral view of the aedeagus; H. Dorsal view of the aedeagus; I. Lateral view of the aedeagus.

2.3 分子鉴定结果

采集于冬青卫矛树干中的 8 头吉丁虫属于

同一单倍型。在 CO I 基因部分序列 (647 bp), 与已报道的俄罗斯两地采集的 *A. euonymi*

(MF805361、MF805206) (Kelnarova I, 2019) 亲缘最近, 相似性达到 99%。建立系统发育树 (图 8) 后, 采集到的大叶黄杨窄吉丁与两条

A. euonymi (MF805361、MF805206) 序列聚为一支, 表明本研究所采集到的吉丁确为 *A. euonymi* (大叶黄杨窄吉丁)。

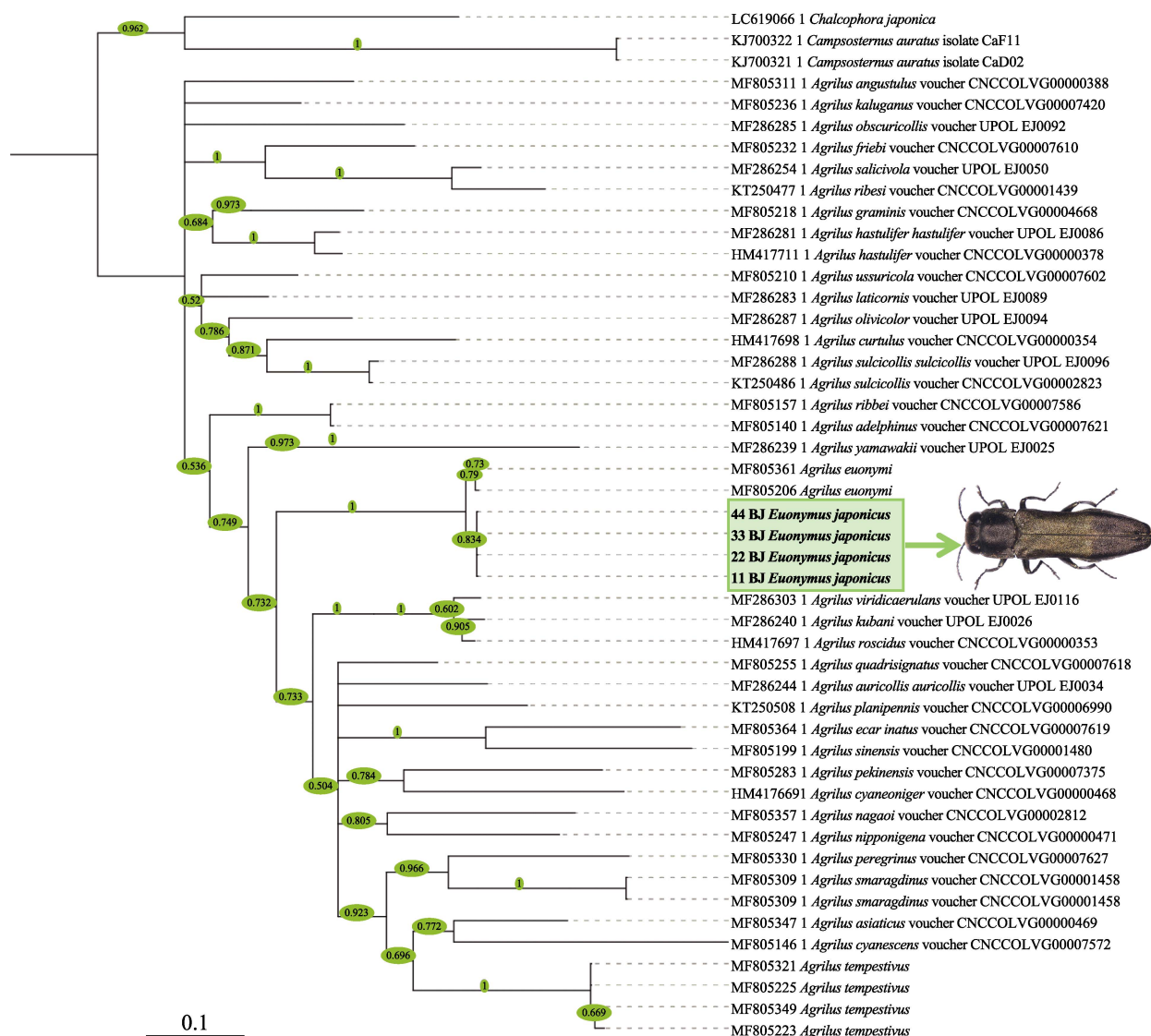


图 8 基于 CO I 基因序列的 MrBayes 系统发育树

Fig. 8 MrBayes phylogenetic tree based on CO I gene sequences

2.4 生物学特性

大叶黄杨窄吉丁 1 年 1 代, 幼虫在冬青卫矛韧皮部与木质部之间以“S”字行或迂回随机向上下方向蛀食, 逐渐蛀食木质部, 可深入木质部 1-2 mm 蛀食, 造成木质部突起; 粪便褐色, 密实堆积于身后坑道内。老熟幼虫先向木质部深处倾斜蛀食, 后转向韧皮部方向蛀食出蛹室, 在此

过程中, 头部会向后折返蛀食以扩大蛹室, 蛹室完成后, 保持该折叠姿态越冬 (图 9: A), 翌年 3 月老熟幼虫身体缩短变粗, 此时幼虫从折叠状态恢复为头部朝向韧皮部, 并以此姿态化蛹 (图 9: B)。4 月开始羽化, 5 月下旬及 6 月上旬为羽化盛期, 羽化后成虫向外钻蛀, 待体壁硬化后蛀出羽化孔 (图 9: C), 爬出后立即开始活动, 反应敏感, 具假死性。成虫喜阳光, 在阳面爬行,

幼虫同样喜温暖,故阳面树皮蛀食亦较严重,虫口密度显著大于阴面。

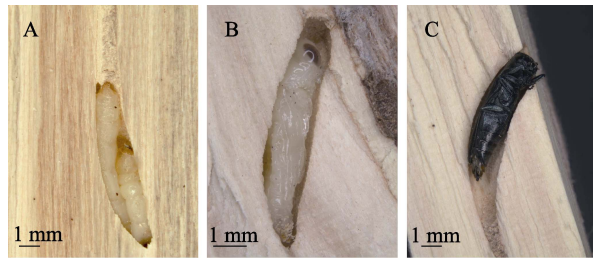


图9 大叶黄杨窄吉丁幼虫(A)、蛹(B)和成虫(C)的生态照片

Fig. 9 Ecological photos of larva (A), pupa (B) and adult (C) of *Agrilus euonymi*

2.5 虫道系统各指标特征

2.5.1 虫口密度 虫口密度可达到 15 头/1 000 cm² ($n=6$), 幼虫喜爱在向阳面进行钻蛀, 坑道明显较阴面密集。绝大部分吉丁仅危害直径大于 2.3 cm 的枝干, 主要危害直径在 2.8-6.8 cm 的枝干。虫口密度较大时, 叶片褪色, 枝条枯死。

2.5.2 蛹室特点 幼虫在当年秋季直接蛀食形成蛹室, 以头部向蛀食反方向折叠身体越冬, 蛹室位于“D”型羽化孔的直线边。调查羽化孔 103 个, 直角边向上 54 个, 向下 49 个, 调查蛹室 208 个, 幼虫在木质部中随机向上向下蛀食出蛹室, 蛹室均在木质部中, 距韧皮部 0.5-1.5 mm, 长度 8-11 mm, 宽度 1.5-3.0 mm, 蛹室椭圆形呈米粒状, 略长 (图 10: A)。

2.5.3 羽化孔特点 大叶黄杨窄吉丁的羽化孔呈向左或向右翻转 90°的“D”形, 羽化孔直线边较短, 弯曲边弧度较大, 整体羽化孔长宽接近 (图 10: B), 旧羽化孔外 0.5-1.0 mm 处树皮形成椭圆环状裂 (图 10: C), 羽化孔直线边长度 1.5-2.2 mm, 主要集中于 1.6-1.9 mm, 平均值 1.78 mm ($n=103$)。

2.5.4 坑道特点 大叶黄杨窄吉丁的虫道主要分布于韧皮部与木质部, 蛹室最大深度深入木质部 6 mm; 蛀道水平分布宽度处于 4-16 cm, 限制其水平拓展虫道的主要原因为所处枝干的直径; 垂直分布长度主要处于 28-48 cm, 最大长度可达 68 cm。危害初期坑道较窄, 后期随幼虫成长不

断拓宽, 最宽处宽度为 1.5-2.5 mm, 最宽坑道可达 3.5 mm。

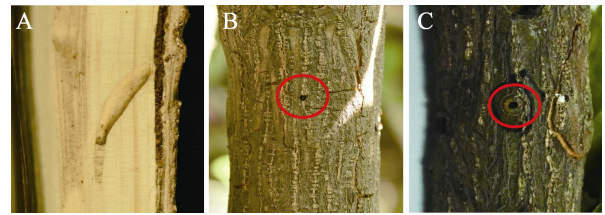


图10 蛹室(A)、新羽化孔(B)和旧羽化孔(C)

Fig. 10 The pupal chamber (A), the new emergence hole (B) and the old emergence hole (C) of *Agrilus euonymi*

2.6 完整坑道系统特征

大叶黄杨窄吉丁蛀食出的坑道具有一定的规律, 根据观测到的形态, 将坑道类型分为两类: 第一类是在虫口密度较小时, 幼虫之间钻蛀不产生相互影响, 幼虫从韧皮部开始钻蛀, 逐渐向木质部蛀食, 在木质部表面留下多个连续“S”形左右迂回坑道, 后蛀食进入木质部, 导致木质部表面坑道突起, 在坑道末端出现不规则圆弧形蛀食坑道 (图 11: A); 第二类是在虫口密度大时 (观察样本中, 虫口密度平均为 15 个/1 000 cm²), 幼虫之间钻蛀产生影响, 在坑道密集处, 坑道表现出上下迂回的形状, 且在蛀食过程中随机向韧皮部或木质部蛀食, 无规律性 (图 11: B, C), 钻蛀至坑道稀疏处会恢复“S”形左右迂回形状坑道 (图 11: B)。



图11 大叶黄杨窄吉丁坑道

Fig. 11 Two types of gallery shapes of *Agrilus euonymi*

A. “S”型坑道; B, C. 密集纵向迂回型坑道。

A. ‘S’ shaped type; B, C. Dense longitudinal meandering type.

2.7 虫道的复原与重建

多角度、全方位对完整且典型的虫道进行拍摄, 共计拍摄 38 张照片, 筛选后选择其中 37 张照片参与坑道模型重建。同时根据照片的坑道及拍摄信息, 将筛选后的照片导入软件进行合成。重建出受害木段三维模型, 可移动视角全面观测虫道, 虫道呈“S”型分布 (图 12: A-C)。

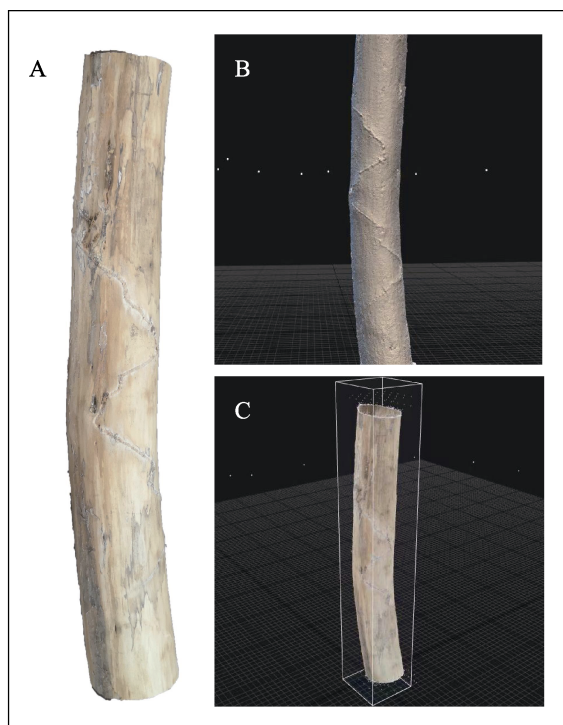


图 12 受害木段的重建三维模型

Fig. 12 The three dimension reconstructions of the gallery in damaged branch

- A. 虫道整体图; B. 虫道纹理模型; C. 受害木段模型。
A. Overall view of the gallery; B. Texture model of the gallery; C. 3D model of the trunk.

3 讨论

近年来, 随着城市绿化面积的不断增长, 大叶黄杨作为优良的绿篱树种越来越多的被应用于道路与社区的, 随着种植面积的不断增长, 受到病虫害危害的威胁也在不断增长, 而本文所研究的大叶黄杨窄吉丁作为一种钻蛀性害虫, 生活史隐蔽, 自然控制能力弱, 因此发生危害后, 由点及面的造成大叶黄杨迅速成片死亡。本文从形态学和分子生物学对其进行了鉴定, 明确了其物

种学名, 详细描述了幼虫、蛹及成虫形态特征, 观察、总结其危害状的各个指标特征, 明确了完整虫道的发生规律。

在本研究之前, 国内危害大叶黄杨的窄吉丁均记述为: *Agrilus nakanei* Kurosawa (惠彦文, 1998), 中文名为大叶黄杨窄吉丁。而根据 Jendek 和 Grebennikov 于 2011 年出版的《*Agrilus* (Coleoptera, Buprestidae) of East Asia》一书中, 目前 *Agrilus nakanei* 已经作为 *Agrilus yamabusi* Miwa&Chûjô 的异名, 且仅分布于日本。而后查阅《Host Plants of World *Agrilus* (Coleoptera, Buprestidae)》一书, *A. yamabusi* 的寄主植物为山茱萸科 Cornaceae 与壳斗科 Fagaceae, 并非本文研究对象的寄主 (卫矛科 Celastraceae) (Akiyama and Ohmomo, 1997; Ohmomo and Fukutomi, 2013; Jendek and Poláková, 2014)。同时惠彦文 (1998) 描述所采集到的吉丁鞘翅后中部有一较宽的斜形黑斑, 而 *A. yamabusi* 该种整体呈灰黑色, 翅面无斑纹, 与采集到的物种不符。因此, 我们认为早期鉴定的种名 *A. nakanei* 为错误鉴定。

根据已知寄主信息, 世界范围内, 卫矛科植物仅卫矛属记录过为窄吉丁虫的寄主, 其中, 危害冬青卫矛 *E. japonicus* 的仅有 *A. euonymi* Tôyama, 1985; 危害欧洲卫矛 *Euonymus europaeus* 的有多种: *Agrilus convexicollis* Redtenbacher, 1847, *Agrilus cyanescens* (Ratzeburg, 1837), *Agrilus graminis* Kiesenwetter, 1857 和 *Agrilus roscidus* Kiesenwetter, 1857; 危害垂丝卫矛 *Euonymus oxyphyllus* 的仅有 *Agrilus daimio* Obenberger, 1936 (Jendek and Poláková, 2014)。这些窄吉丁中, 在我国有分布的仅有 *A. euonymi* 和 *A. cyanescens* (Ratzeburg, 1837), 两者体型大小相似, 前者整体黑褐色, 翅面具不同颜色的斑纹, 后者整体蓝色, 鞘翅上无斑纹, 容易进行区分。从采集到的虫体形态特征来看, 此次北京采集到的窄吉丁和此前描述的大叶黄杨窄吉丁均应为 *Agrilus euonymi* Tôyama, 1985。

分子生物学结果显示, 该吉丁与俄罗斯远东采集的 *A. euonymi* 亲缘最近且在系统发育树中聚为一支, 因此本研究综合形态学特征和基于

CO I 序列的分子生物学结果认为: 前述研究中的 *Agrilus nakanei* Kurosawa 属鉴定错误, 订正其学名为 *A. euonymi* 1985。近年出版的《中国吉丁虫图鉴》一书收录 *A. euonymi* 并将其中文名定为——欧氏窄吉丁(彭忠亮, 2021)。欧氏窄吉丁一名为首次出现, 未能体现该窄吉丁寄主特点。通过查阅《Host Plants of World *Agrilus* (Coleoptera, Buprestidae)》一书 *A. euonymi* 的寄主包括大叶黄杨 *Euonymus japonicus*、蒙古栎 *Quercus mongolica* 和樱 *Prunus yedoensis*, 国内目前大叶黄杨(冬青卫矛)上仅有该吉丁一种危害, 亦未见该吉丁危害蒙古栎和樱的报道, 且前人多使用“大叶黄杨窄吉丁”进行报道, 因此为减少中文名冗余及使用混乱, 本文沿用“大叶黄杨窄吉丁”这一中文名。

窄吉丁 *Agrilus* 属作为一个超大属, 据《中国吉丁虫》一书中记录, 截至 2021 年, 包括我国台湾在内, 该属共有 296 种及亚种被记载(彭忠亮, 2021)。窄吉丁属物种如此繁多, 部分物种之间外部形态特征相似, 较难区分。大叶黄杨窄吉丁有一明显特征: 鞘翅端部 1/3 处有一黑色斑块。通过对比图鉴种 174 种及亚种, 除本文研究的大叶黄杨窄吉丁以外, 我国另有 4 种窄吉丁有此特征, 分别为短纹窄吉丁 *Agrilus brevinotus* Jendek, 2011、满族窄吉丁 *Agrilus manchu* Jendek, 2011、西山氏窄吉丁 *Agrilus nishiyamai* Tôyama, 1985 以及津岛窄吉丁 *Agrilus tsushimanus* Kurosawa, 1963。其中短纹窄吉丁 *A. brevinotus* 和满族窄吉丁 *A. manchu* 体长(3.5-5.0 mm)与大叶黄杨窄吉丁(5-8 mm)相比较小, 可据此将二者与大叶黄杨窄吉丁进行区分。西山氏窄吉丁 *A. nishiyamai* 与津岛窄吉丁 *A. manchu* 鞘翅端部斑块较小, 且鞘翅翅顶呈圆弧状, 而大叶黄杨窄吉丁翅顶平截, 可据此将二者与大叶黄杨窄吉丁进行区分。

大叶黄杨窄吉丁分布广泛, 主要分布于亚洲, 在我国分布于吉林、河南、陕西、上海等地(彭忠亮, 2021), 本次在北京的研究亦为首次在北京记录到该虫发生危害, 在踏查过程中, 在除本研究样本采集处伯儒苑社区以外, 还在北京

科技大学校园等位置发现此种吉丁危害, 因此推测该虫已成为北京地区大叶黄杨的常见虫害。目前的报道与记录其发生世代均为一年一代(惠彦文, 1998), 与本研究相同。大叶黄杨窄吉丁羽化时间与分布区域, 其中成虫在福州市 5 月初即可羽化, 而在北京成虫羽化时间推迟到 5 月底。大叶黄杨窄吉丁分布广, 纬度差距大, 因此对其羽化高峰期, 雌雄性别比例, 交配习性, 发生规律等受纬度, 海拔, 气候影响的相关规律性仍需进一步研究。

该吉丁寄主为我国大范围使用的绿化树种——大叶黄杨(冬青卫矛), 该树种原产于我国北方, 早在 20 世纪 50 年代长江流域(如上海, 江浙等地)就已将其作为绿化树种使用(张丽峰, 1959)。如今我国北至黑龙江(邢贵彬和李连海, 2016), 南至广东(秦小艳等, 2011)均有种植, 因此以上地区, 皆有可能存在该蛀干害虫, 或成为该吉丁的潜在适生区。而大叶黄杨窄吉丁多选择干部直径较粗的枝干危害, 而此类大叶黄杨多为种植时间较久, 景观效果已成型的城市绿篱, 因此受到危害枯萎死亡后, 生态和景观价值损失较大, 同时补植难度更大, 更换成本更高, 从而造成的损失较其他病虫害更大。因此及时的发现危害, 做出防治, 以减少景观、生态以及经济上的损失是非常必要的。

大叶黄杨窄吉丁属蛀干害虫, 与大叶黄杨常见病害有较大区别, 如白粉病, 炭疽病等, 病害发生时在叶片部分具有明显表现, 白粉病发生时, 叶面、叶背面或嫩枝表面布满白色粉末状物, 后期变为灰白色毛毡状(高发明等, 2018), 炭疽病导致叶片的正面出现一些不规则的褪绿斑点(吴曼颖和熊兴耀, 2020)。而窄吉丁危害与多数蛀干害虫相同, 导致受害枝干叶片褪色, 枯黄。双斑锦天牛同样为蛀干害虫, 主要危害寄主根部及根基部; 在植株外观上, 由于双斑锦天牛幼虫危害从大叶黄杨的根基处向上钻蛀, 因此导致全株叶片逐渐枯黄(余黎红等, 2007), 而结合本研究, 大叶黄杨窄吉丁选择枝干部进行蛀食, 因此在受危害过程中, 部分枝条先受害枯黄, 不同受害程度的枝条枯黄程度相差较大。同时二

者羽化孔大小、形状与位置也有较大区别: 双斑锦天牛羽化孔大, 6-10 mm, 呈圆形, 位于树干基部(余黎红等, 2007); 大叶黄杨窄吉丁羽化孔小, 小于 2.5 mm, 呈“D”形, 位于较粗的枝干部。依据以上特征可以清楚的将大叶黄杨窄吉丁与其他病虫害进行区分, 更有针对性的防治。

大叶黄杨窄吉丁蛀食枝干, 导致不同枝呈阶段性逐渐失绿枯黄, 因此在危害初期可观测到大叶黄杨构成的绿篱中出现部分枝条萎蔫失绿(图 5)。在实际生产中, 观查到以上现象时, 可进行细致调查: 当植株已出现萎蔫时, 内部输导组织已被破坏, 难以挽救, 此时应及时清理萎蔫植株, 同时观察其枝干有无“D”形羽化孔, 对树干进行解剖, 查看有木质部与韧皮部之间坑道情况, 确定是否为窄吉丁危害。在确定受窄吉丁危害之后, 及时进行防治, 化学防治方法可参考同为窄吉丁属的白蜡窄吉丁: 北京地区大叶黄杨窄吉丁成虫期为 5 月下旬至 6 月下旬, 在成虫羽化产卵期间, 可喷洒氯氰菊酯微囊剂(绿色威雷)、高效氯氰菊酯乳油(国光功夫)等药物(毕沙拉·对山别克和王洁, 2022), 或树干注射百治磷(Bidrin)进行防治(McCullough *et al.*, 2004); 在幼虫孵化初期, 可使用药物涂抹树干等方式(孙元等, 2013), 以杀死初孵幼虫。生物防治方面, 由于寄生性天敌往往具有专性寄生的特点, 因此不能简单使用“拿来主义”, 但可借鉴其他窄吉丁的天敌昆虫选择, 如在肿腿蜂科(武辉等, 2008)、茧蜂科(王小艺, 2005)或小蜂科(王悦等, 2021)进行天敌昆虫的筛选。

三维重建技术是利用图像信息获取物体空间结构的一种技术, 是计算机视觉领域最热门的研究方向之一, 作为近些年不断兴起的研究手段, 在医学, 计算机, 工程学中率先得到了广泛应用(Castro *et al.*, 2021; Saura-Gómez *et al.*, 2021; Tan *et al.*, 2022)。在昆虫学中也有着多种应用, 王军等(2012)利用光投影数字化传感系统构建飞蝗表面三维结构, 连国云等(2013)对东亚飞蝗脑进行三维重建, 赵晨静(2017)使用显微 CT 技术对草蛉进行扫描重建。传统三维建模技术需要技术人员设计复杂的几何模型, 进

行复杂的参数调整, 或是通过激光雷达获取点云数据, 再进行贴图建模, 门槛和工作量都很大。而基于图像的绘制 Image-based-Rendering (IBR) 方法是一种便捷而动态的呈现方式, 仅需在不同视点拍摄一定数量的 RGB 照片, 即可在未拍摄的新视点利用原始图像信息, 计算合成逼真的目标物画面(李明豪, 2021)。仅需要 RGB 图像信息便可完成较高精度重建, 使用手机等亦可图像采集工作, 快速为后续研究提供了直观且立体的研究数据。未来研究中, 可使用该技术建立各种蛀干昆虫危害状数据库, 在实际生产中, 林业工作者可拍摄蛀干害虫危害状照片, 快速完成建模。将自建模型比对模型数据库, 初步判别危害昆虫种类, 进行及时防控, 同时为后续研究跟进提供了第一手直观立体的数据基础。另一方面, 在已知害虫种类的情况下, 对照数据库, 确定其坑道类型, 针对不同类型坑道的走势与位置, 可更科学有效、有针对性地对害虫进行防控, 例如树干注药法、药物熏蒸法、毒签插入法等方法。

综上, 随着城市绿化中大叶黄杨面积的不断增加, 大叶黄杨窄吉丁作为其害虫的危害也在不断增加。随着苗木的地区间调运, 大叶黄杨窄吉丁的危险等级也在不断上升, 因此苗木检疫、受害植株的发现、清理显得更加重要。本文对大叶黄杨窄吉丁的形态学、受害植株的外部表现与内部坑道的形态的描述与研究, 为及时发现、鉴定、防治, 提供了更为可靠的参考与支持。

参考文献 (References)

- Akiyama K, Ohmomo S, 1997. A check list of the Japanese Buprestidae. *Gekkan-Mushi*, 1997(Suppl. 1): 1-67.
- Bisala DSBK, Wang J, 2022. Occurrence regularity and prevention measures of *Agrilus planipennis* Fairmaire. *Rural Science & Technology*, 2022(2): 37-39. [毕沙拉·对山别克, 王洁, 2022. 白蜡窄吉丁发生规律及防治措施. 农村科技, 2022(2): 37-39.]
- Castro PT, Fazecas T, Matos APP, Ribeiro G, Júnior EA, Werner H, 2021. Concomitant fetal duodenal and esophageal atresia: Three-dimensional reconstruction from magnetic resonance imaging. *Ultrasound in Obstetrics & Gynecology*, 59(2): 277-278.
- Dong L, 2001. The investigation of broad-leaved evergreen plants

- introduced in Beijing open and suggestion for the future research. *Journal of Beijing Forestry University*, 23(S2): 68–70. [董丽, 2001. 北京园林中常绿阔叶植物引种栽培现状及思考. 北京林业大学学报, 23(S2): 68–70.]
- Gao FM, Yu XM, Kong AH, Nie YF, Yuan XW, 2018. Cause analysis and control strategies of powdery mildew of *Euonymus japonicus*. *Journal of Green Science and Technology*, 2018(11): 40–41, 43. [高发明, 于祥民, 孔爱辉, 聂亚芳, 袁学文, 2018. 大叶黄杨白粉病的发生原因分析与防治策略. 绿色科技, 2018(11): 40–41, 43.]
- Hui YW, 1998. Preliminary study on *Agrilus* sp. on *Euonymus japonicus*. *Entomological Knowledge*, 35(4): 224. [惠彦文, 1998. 大叶黄杨窄吉丁虫初步研究. 昆虫知识, 35(4): 224.]
- Jendek E, Grebennikov V, 2011. *Agrilus* (Coleoptera, Buprestidae) of East Asia. Prague: Nakladatelství Jan Farkač. 94.
- Jendek E, Poláková J, 2014. Host Plants of World *Agrilus* (Coleoptera, Buprestidae). New York: Springer International Publishing. 145, 398.
- Jin GL, Cheng H, 1981. A brief report on *Agrilus* sp. on *Euonymus japonicus*. *Entomological Knowledge*, 18(6): 253. [荆贵兰, 程沪, 1981. 大叶黄杨小吉丁虫研究简报. 昆虫知识, 18(6): 253.]
- Kelnarova I, Jendek E, Grebennikov VV, Bocak L, 2019. First molecular phylogeny of *Agrilus* (Coleoptera: Buprestidae), the largest genus on Earth, with DNA barcode database for forestry pest diagnostics. *Bulletin of Entomological Research*, 190(2): 200–211.
- Li MH, 2021. Research on image-based free viewpoint synthesis. Master dissertation. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications. [李明豪, 2021. 基于图像的自由视点合成方法研究. 硕士学位论文. 北京: 北京邮电大学.]
- Lian GY, Li DZ, Chen YK, Lou YX, Liu ZG, 2013. Morphological observation and 3D reconstruction of the brain of *Locusta migratoria manilensis*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 50(2): 513–517. [连国云, 李德智, 陈义昆, 娄延霞, 刘志刚, 2013. 东亚飞蝗脑的形态学观察及三维重建. 应用昆虫学报, 50(2): 513–517.]
- Liu JG, Liu JZ, Song XB, 2016. Occurrence and control of *Agrilus* sp. on *Euonymus japonicus* in Guanzhong area. *Shaanxi Forestry Science and Technology*, 2016(3): 93–95. [刘建功, 刘景治, 宋晓斌, 2016. 关中地区大叶黄杨窄吉丁虫发生与防治. 陕西林业科技, 2016(3): 93–95.]
- McCullough DG, Cappaert D, Poland T, Smitley DR, 2004. Control of emerald ash borer and larvae with insecticides//Mastro V, Reardon R (eds.). Proceedings of Emerald Ash Borer-2003 Research and Technology Development Meeting. Michigan. 27–28.
- Ohmomo S, Fukutomi H, 2013. The Buprestid Beetles of Japan. Tokyo: Mushi Sha Iconographic Series of Insects. 7, 206.
- Peng ZL, 2021. An Iconography of Chinese Buprestidae (Coleoptera). Fujian: Straits Publishing House. 345, 364, 393, 403, 473. [彭忠亮, 2021. 中国吉丁虫图鉴. 福建: 福建书局. 345, 364, 393, 403, 473.]
- Qin XY, Yan SX, Wei FY, 2011. Geographical distribution of Celastraceae in China. *Journal of Northeast Forestry University*, 39(1): 120–123. [秦小艳, 闫双喜, 位凤宇, 2011. 中国卫矛科植物地理分布. 东北林业大学学报, 39(1): 120–123.]
- Ratzeburg JTC, 1837. Die forst insecten oder abbildung und beschreibung der in den wäldern preussens und der nachbarstaaten als schädlich oder nützlich bekannt gewordenen Insekten//Systematischer folge und mit besonderer rücksicht auf die vertilgung der schädlichen. Erster Theil. Berlin: Die Käfer. Nicolai Buchhandlung, Druckerei der Königlichen Akademie der Wissenschaften. 61.
- Saura-Gómez P, Spairani-Berrio Y, Huesca-Tortosa JA, Spairani-Berrio S, Rizo-Maestre C, 2021. Advances in the restoration of buildings with LIDAR technology and 3D reconstruction: Forged and vaults of the refectory of santo domingo de orihuela (16th Century). *Applied Sciences*, 11(18): 8541.
- Spivey AC, Weston M, Woodhead S, 2002. *Celastraceae sesquiterpenoids*: Biological activity and synthesis. *Chemical Society Reviews*, 31(1): 43–59.
- Sun Y, Wang XW, Duan JJ, Wang GQ, 2013. Advances of comprehensive control on *Agrilus planipennis* Fairmaire. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 29(18): 158–161. [孙元, 王哲玮, 段建军, 王贵强, 2013. 白蜡窄吉丁综合防控研究进展. 中国农学通报, 29(18): 158–161.]
- Tan ZY, Zhao BL, Ji YX, Xiao B, Kong ZW, Liu T, Luo MZ, 2022. A welding seam positioning method based on polarization 3D reconstruction and linear structured light imaging. *Optics and Laser Technology*, 151: 108046–108056.
- Toyama, M, 1985. The buprestid beetles of the subfamily Agrilinae from Japan (Coleoptera, Buprestidae). *Elytra*, 13(1): 19–47.
- Wang J, Li AM, Liu XL, Liu ZG, 2012. The three dimensional structure of the migratory locusts's exoskeleton as revealed by a light projection digital sensing system. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 49(1): 255–258. [王军, 李阿蒙, 刘晓利,

- 刘志刚, 2012. 基于光投影数字化传感系统的飞蝗表面三维结构. 应用昆虫学报, 49(1): 255–258.]
- Wang XY, 2005. Biology of the emerald ash borer and its biological control. Doctor dissertation. Beijing: Chinese Academy of Forestry. [王小艺, 2005. 白蜡窄吉丁的生物学及其生物防治研究. 博士学位论文. 北京: 中国林业科学研究院.]
- Wang Y, Wang JJ, Li DQ, Luan QS, Wei JR, 2021. Investigation of natural parasitism of *Tetrastichus planipennisi* against *Agrilus planipennis*. *Forest Pest and Disease*, 40(6): 33–35. [王悦, 王建军, 李德全, 栾庆书, 魏建荣, 2021. 白蜡吉丁啮小蜂自然寄生情况调查. 中国森林病虫, 40(6): 33–35.]
- Wu H, Wang XY, Li ML, Yang ZQ, Zeng FX, Wang HY, Bai L, Liu SJ, Sun J, 2008. Biology and mass rearing of *Sclerodermus pupariae* Yang et Yao (Hymenoptera: Bethyridae), an important ectoparasitoid of the emerald ash borer, *Agrilus planipennis* (Coleoptera: Buprestidae). *Acta Entomologica Sinica*, 51(1): 46–54. [武辉, 王小艺, 李孟楼, 杨忠岐, 曾繁喜, 王红艳, 白玲, 刘松君, 孙进, 2008. 白蜡吉丁肿腿蜂的生物学和生态学特性及繁殖技术研究. 昆虫学报, 51(1): 46–54.]
- Wu MY, Xiong XY, 2020. Pathogen identification of anthracnose on *Euonymus japonicus* in Hunan Province. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 46(6): 706–710. [吴曼颖, 熊兴耀, 2020. 张家界大叶黄杨炭疽病的病原菌鉴定. 湖南农业大学学报(自然科学版), 46(6): 706–710.]
- Xing GB, Li LH, 2016. Cultivation and management techniques of *Euonymus japonicus*. *Henan Agriculture*, 2016(14): 48. [邢贵彬, 李连海, 2016. 大叶黄杨栽培与管护技术. 河南农业, 2016(14): 48.]
- Yu LH, Chen GL, Liu HJ, 2007. Bionomics and control of *Acalolepte sublusca*. *Plant Protection*, 33(2): 108–110. [余黎红, 陈国利, 刘国军, 2007. 双斑锦天牛的生物学特性及防治. 植物保护, 33(2): 108–110.]
- Zhang LF, 1959. Research of *Abraxas miranda* Butler. *Acta Entomologica Sinica*, 9(6): 540–547. [张丽峰, 1959. 大叶黄杨尺蠖 (*Abraxas miranda* Butler) 的研究. 昆虫学报, 9(6): 540–547.]
- Zhang D, Gao FL, Ivan Jakovlić, Zou H, Zhang J, Li WX, Wang GT, 2020. PhyloSuite: An integrated and scalable desktop platform for streamlined molecular sequence data management and evolutionary phylogenetics studies. *Molecular Ecology Resources*, 20(1): 348–355.
- Zhao CJ, 2017. Transformation of internal structures during the metamorphosis of *Chrysopa pallens* (Rambur, 1838) (Neuroptera: Chrysopidae) based on 3D reconstruction. Doctor dissertation. Beijing: China Agricultural University. [赵晨静, 2017. 基于三维重建技术的大草蛉不同虫态内部结构的形态学研究. 博士学位论文. 北京: 中国农业大学.]
- Zhao YZ, Zhao YL, 2017. Occurrence and control of *Pryeris sinica* Moore and *Agrilus* sp. on *Euonymus japonicus*. *Modern Rural Science and Technology*, 46(9): 33–34. [赵彦征, 赵艳玲, 2017. 大叶黄杨斑蛾和窄吉丁虫的发生与防治. 现代农村科技, 46(9): 33–34.]