日本松干蚧的六种寄主松树次生代谢酚类和挥发物成分分析*

王孟筱[1**] 张新慰[1**] 任广娟[1] 王 静[1] 李 洋[2]
曲永赟[1] 马安宝[1] 石 磊[1] 段贝宁[1] 武海卫[1***]
（1. 山东省林业科学研究院，济南 250014；2. 泰安市徂徕山林场，泰安 271029）

摘 要 **【目的】** 日本松干蚧 *Matsucoccus matsumurae* 作为外来入侵害虫，对松林的健康和生态安全构成了严重威胁。本研究旨在探索日本松干蚧不同抗性寄主次生代谢和挥发性物质差异，为今后探索化学生态诱导、寻找环境友好型杀虫剂、开发影响昆虫行为的化学信息物质等防控日本松干蚧的应用提供理论依据。**【方法】** 本研究通过靶向代谢物检测和动态顶空进样 GC/MS 法对 6 种松树易被日本松干蚧寄生部位的非挥发性次生代谢酚类和挥发性次生代谢有机物的种类和含量进行研究分析。**【结果】** 易被日本松干蚧寄生部位的枝条树皮内的单宁和酚酸，尤其是儿茶素和表儿茶素与树种抗性呈正相关；抗性树种樟子松 *Pinus sylvestris* 特有且相对含量大的挥发性有机物有(+)-柠檬烯、莰烯、3-蒈烯和 γ-杜松烯，感性树种赤松 *P. densiflora* 中相对含量较大的有月桂烯和水芹烯。**【结论】** 儿茶素和表儿茶素可作为判断日本松干蚧抗性树种的指示性指标。(+)-柠檬烯、莰烯、3-蒈烯、γ-杜松烯、月桂烯和水芹烯等不同抗性树种的特异性挥发物是对日本松干蚧具有驱避或引诱效果的化合物。

关键词 日本松干蚧；松树；次生代谢物；酚类；挥发物

Analysis of secondary metabolic phenols and volatile compounds in six host plants of *Matsucoccus matsumurae*

WANG Meng-Xiao[1**] ZHANG Xin-Wei[1**] REN Guang-Juan[1] WANG Jing[1] LI Yang[2]
QU Yong-Yun[1] MA An-Bao[1] SHI Lei[1] DUAN Bei-Ning[1] WU Hai-Wei[1***]
(1. Shandong Academy of Forestry, Jinan 250014, China; 2. Culai Mountain National Forest Park, Tai'an 271029, China)

Abstract **[Aim]** To explore the differences in secondary metabolites and volatile organic compounds among different resistant hosts of *Matsucoccus matsumurae*, and to identify eco-friendly insecticides and semiochemicals that influence insect behavior, with the aim of improving control strategies against *M. matsumurae*. This exotic invasive pest poses serious threats to pine forest health and ecological security. **[Methods]** Non-volatile secondary metabolites (phenolic compounds) and volatile organic compounds were identified and analyzed in six pine species with varying resistance to *M. matsumurae* infestation, using targeted metabolomics and dynamic headspace GC/MS. **[Results]** Tannins and phenolic acids, particularly catechins and epicatechins, in the bark of branches that are easily parasitized by *M. matsumurae* are positively correlated with resistance to this pest. A resistant species, *Pinus sylvestris*, has unique and relatively high levels of volatile organic compounds such as (+)-limonene, camphene, 3-carene, and γ-cadinene, whereas a susceptible species, *P. densiflora*, contains relatively higher levels of myrcene and phellandrene. **[Conclusion]** Catechins and epicatechins can indicate whether a pine species is resistant to *M. matsumurae*. The specific volatile compounds found in different resistant tree species, such as (+)-limonene, camphene, 3-carene, γ-cadinene, myrcene, and phellandrene, may be attractive, or repellent, to *M. matsumurae*.

*资助项目 Supported project：国家重点研发计划子课题（2022YFD1401004）
**共同第一作者 Co-first authors，E-mail：sdslkywmx@163.com；zhangxinwei892@163.com
***通讯作者 Corresponding author，E-mail：haiweiw@126.com
收稿日期 Received：2024-09-20；接受日期 Accepted：2024-12-25

Key words *Matsucoccus matsumurae*; pine trees; secondary metabolites; phenols; volatile compounds

日本松干蚧 *Matsucoccus matsumurae* 属半翅目 Hemiptera 松干蚧科 Matsucoccidae 松干蚧属 *Matsucoccus*，原产日本东京（杨钤等，2013），目前分布于北半球的多个国家，包括日本、美国、韩国、俄罗斯、朝鲜以及乌克兰，尚未有报道显示其存在于南半球（孙锡麟和李广武，1982；Foldi, 2004），是一种对松科植物构成严重威胁、极具破坏性的外来入侵害虫。自 1942 年首次在国内辽宁省发现后，已从东北地区逐步扩散至华北、华南、西北及西南等地区 12 个省（直辖市，自治区）（刘卫敏等，2015；田茂娟，2021）。在北方主要为害赤松 *Pinus densiflora*、油松 *P. tabulaeformis* 和黑松 *P. thnbergii*（任广娟等，2024），在南方主要为害马尾松 *P. massoniana*、黄山松 *P. taiwanensis*、黄松 *P. massoniana*×*P. thunbergii*、琉球松 *P. luchuensis*（李刚等，2016）、美加红松 *P. resinosa*（田茂娟，2021）、偃松 *P. pumila*（葛芳，2016）等松属植物。该虫主要寄生于松树的枝梢、树干等部位，通过吸食树汁对树木造成损害。受害后的松树长势减弱，针叶变黄枯萎，松枝弯曲下垂，树皮翘起严重，进而易发生弱寄生性病害和次期性害虫侵袭，最终使松树迅速死亡（孙锡麟等，1985；任卫红和赵恒刚，2018），对松林的健康和生态安全构成严重威胁。

目前，国内外主要通过化学药剂防治日本松干蚧（任雪敏等，2022）。由于日本松干蚧体型微小，虫体外覆有一层白色蜡质，幼虫阶段常隐匿于树皮翘起处，且世代更迭频繁（Liu *et al.*，2014），喷施药剂往往达不到很好的防治效果，故多采用打孔注药氧化乐果、久效磷的方式进行防治，但打孔注药存在对树干损伤大，多次注药后松树易风折、人工成本高等缺点，以及长期大量使用化学农药导致日本松干蚧耐药性增强、环境污染和生物多样性被破坏等问题，使得化学防治的效果不尽人意。自日本松干蚧陆续侵袭多国，引发严重的经济损失与生态破坏以来，众多学者已着手研究利用天敌昆虫、病原微生物等手段来防控日本松干蚧（霍玉林等，1983；柴希民，1999；任雪敏等，2024）。当前，针对日本松干蚧的有效防控，研究植物-植食性昆虫-天敌之间的互作、探索化学生态诱导、开发影响昆虫行为的化学信息物质、寻找环境友好型杀虫剂等方面成为新的研究热点（孙江华等，2000）。

经过长期协同进化，昆虫对植物的取食不仅取决于植物本身的营养价值，很大程度上受植物次生代谢产物的调控影响（胡家会，1998）。次生代谢物是植物次生代谢过程中产生的一类对细胞生命活动及植物正常生长发育非必需且具有物种特异性的小分子有机化合物，是植物与周围环境长期相互作用的结果。非挥发性次生代谢物酚类化合物是植物众多次生代谢产物中较为重要的一类化合物。越来越多的研究发现，酚类化合物显著影响植物与生态环境之间的关系，一些对昆虫有防御效应的单宁、酚酸等是植物防御植食性害虫的重要物质（任琴，2006）。植物挥发性物质包括烃类、醇类、酯类、酮类、酸类、有机酸、含氮化合物以及含硫有机化合物等植物次生性物质（宋效惠，2021）。不同植物含有的挥发物各不同，并且以一定的比例组合成该种植物的化学指纹图（周琼和梁广文，2001），在昆虫寻找寄主、取食和繁殖等行为中发挥重要的定位标识和信号传导作用（Heath *et al.*，1992；戴建青等，2010；施伟，2010；Zhuge *et al.*，2010；张俊宇等，2016）。本研究通过对日本松干蚧具有不同抗性的 6 种松科植物挥发性次生代谢物和非挥发性次生代谢物的分析和比较，明确各寄主植物次生代谢物组分，为进一步研究影响昆虫行为的信息化学物质、诱导植物产生防御抗性、筛选和开发化学生态诱导剂和植物源引诱剂提供基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验中的 6 个树种赤松、油松、黑松、黄山松、雪松 *Cedrus deodara* 和樟子松 *P. sylvestris* 样本采集自山东省泰安市徂徕山林场 10 年人工株

间混交实生松林（36°2′30.50″N，117°14′41.79″E），海拔 320 m，坡向西北，坡度 30°，株行距 2 m×2 m。在徂徕山林场日本松干蚧虫情调查中，观察到日本松干蚧受害最为严重的是赤松，油松受害程度较轻；黑松和黄山松虽然属于日本松干蚧的寄生树种，但在试验林中并未发现有日本松干蚧为害；樟子松为已知的日本松干蚧抗性树种，雪松属于松科雪松属，暂未发现有日本松干蚧寄生。

1.2　非挥发性次生代谢物采集与分析

2024 年 5 月 19 日，采集 10 a 生人工混交松林，日本松干蚧寄生部位 3-5 年树枝，现场去掉外表翘皮后将树皮剥出，迅速放入液氮中带回实验室，将每种树的样品混合均匀后分成 3 等份，每份为 1 个重复，设 3 次重复。

酚酸含量测定：取 0.2 g 样品至离心管中，加入 0.5 mL 80%甲醇水溶液（含 0.2%维生素 C），涡旋混匀，在室温条件下超声提取 30 min，12 000 r/min 离心 10 min，取上清液，重复提取 2 次，合并混匀稀释数倍后进行上机检测。仪器：超高效液相色谱（Vanquish，UPLC，Thermo，USA）、高分辨质谱仪（Q Exactive，Thermo，USA）。液相色谱参数：色谱柱：Waters HSS T3（50 mm×2.1 mm，1.8 μm）；流动相：A 相为超纯水溶液（含 0.1%乙酸），B 相为乙腈溶液（含 0.1%乙酸）；流速 0.3 mL/min；柱温 40 ℃；进样量 2 μL；洗脱梯度：0 min A 相/B 相（90∶10，v/v），2 min A 相/B 相（90∶10，v/v），6 min A 相/B 相（40∶60，v/v），8 min A 相/B 相（40∶60，v/v），8.1 min A 相/B 相（90∶10，v/v），12 min A 相/B 相（90∶10，v/v）。质谱参数：配备有电喷雾离子源（Electrospray ionization，ESI），鞘气 40 arb，辅助气 10 arb，离子喷雾电压 - 2 800 V，温度 350 ℃，离子传输管温度 320 ℃。扫描模式为单离子检测（SIM）模式，扫描方式为负离子。一级扫描范围（Scan m/z range）为：80-350。

单宁：取 0.2 g 样品至离心管中，加入 1 mL 70%甲醇溶液，涡旋混匀，在 40 ℃下超声提取 15 min，12 000 r/min 离心 10 min，取上清液，重复提取 2 次，合并混匀稀释数倍后进行上机检测。仪器同酚酸。液相色谱参数：色谱柱：Waters HSS T3（50 mm×2.1 mm，1.8 μm）；流动相：A 相为超纯水溶液（含 0.1%甲酸），B 相为乙腈溶液（含 0.1%甲酸）；流速 0.3 mL/min；柱温 40 ℃；进样量 2 μL；洗脱梯度：0 min A 相/B 相（90∶10，v/v），1 min A 相/B 相（90∶10，v/v），6 min A 相/B 相（65∶35，v/v），8 min A 相/B 相（5∶95，v/v），10 min A 相/B 相（5∶95，v/v），10.1 min A 相/B 相（90∶10，v/v），12 min A 相/B 相（90∶10，v/v）。质谱参数同酚酸，一级质谱扫描范围（Scan m/z range）为：120-500。

1.3　挥发性次生代谢物采集与分析

在同一时间段内，采用简单随机抽样法，选择健康的 5-6 年生松树，在待测松树木段 3 年生枝条处采用动态顶空气体法收集挥发物，每棵为一重复，设 3 次重复。将树皮表面清理干净，用两端开口的聚乙烯袋（406 mm×444 mm, Reynolds, Richmond, VA）作为收集袋，包裹枝条并用橡皮筋将两端密封，收集袋一端通过聚四氟乙烯（PVC）软管连接活性炭玻璃管，另一端通过聚四氟乙烯（PVC）软管连接热解析型 TVOC 吸附管和大气采样仪（CCZG5，北京市科安劳保新技术有限责任公司），吸附管填充有 Tenax TA（60/80 mesh, Supelco, Bellefonte, DE, USA），大气采样仪将袋抽真空，泵入由玻璃活性炭管过滤后的净化空气，气体流量为 500 mL/min，密闭循环采气 150 min。

挥发物的分析鉴定：仪器：全自动热解析仪（TCT, ATDS-20A, 中仪宇盛，北京）、气质联用仪（GC/MS, Trace1300/ISQ7000, Thermo, USA）。热解析条件：热脱附解吸 1 温度 300 ℃，阀箱温度 150 ℃，管线 200 ℃，制冷时间 4 min，等待 1 min，解吸 4 min，反吹 3 min，解吸 2 温度 320 ℃。气质仪器条件：色谱柱：DB-5MS，30 m×0.25 mm×0.25 μm；柱温：初温 35 ℃保持 3 min，以 12 ℃/min 升至 120 ℃，再以 8 ℃/min 升至 200 ℃，保持 2 min；进样口温度：200 ℃；传输线温度：260 ℃；载气流速：1.2 mL/min；质谱条件：离子源温度：330 ℃，质谱：EI 源，70 eV；模式：全扫 40-500。采用 TurboMass Ver 6.4.2 软件，通过 NIST2017 谱图库检索，结合人

工读图解析挥发物的组成成分。

1.4 数据分析

酚类：通过标准品总离子流图，对样品离子流图中各峰进行检索，通过外标法对化合物进行定量分析。挥发物：对离子流图中各峰进行质谱计算机数据系统检索并核对 Nist20，标准质谱图确定挥发物的化学成分，通过峰面积归一化法测定各化学成分的相对含量。数据采用 SPSS Statistics 25.0（IBM，美国）进行统计分析，不同树种间同一指标差异采用单因素方差分析（One-way ANOVA），事后多重比较采用 Tukey 检验，不同组间差异采用最小显著差异法（Least significant difference, LSD）进行，柱形图使用 Excel 2016 作图。

2 结果与分析

2.1 6 种松树的非挥发性次生代谢物质分析

日本松干蚧主要寄生部位树皮中的单宁含量樟子松>黑松>油松>雪松>赤松>黄山松（图 1），单因素方差分析显示各树种间存在极显著差异（F=1 493.263，P<0.01），感性树种赤松、油松、黑松和黄山松的单宁含量较抗性树种樟子松低。日本松干蚧主要寄生部位树皮中的酚酸含量樟子松>黑松>油松>黄山松>赤松>雪松（图 1），单因素方差分析显示各树种间存在极显著差异（F=1 278.596，P<0.01），感性树种赤松、油松、黑松和黄山松的酚酸含量较抗性树种樟子松低。雪松树皮内的单宁、酚类物质含量也较低，但雪松为落叶松亚科雪松属，并非常见的日本松干蚧寄主所属的松亚科松属，且北方常见的雪松一般作为景观树种单独造景，所以并未发现雪松出现日本松干蚧疫情。

结合林场当地 50-60 年松树混交林中日本松干蚧虫情调查，日本松干蚧的主要寄生树种是赤松，油松上偶有发现，黑松上没有发现日本松干蚧，这与该 3 种松树在自然状态下的 3-5 年枝条树皮的单宁含量的差异一致，自然状态下相对较高的单宁、酚酸含量可能是松树对日本松干蚧有抑制作用的原因之一。

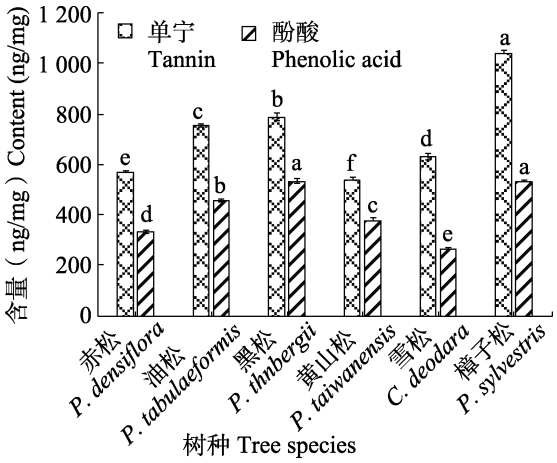


图 1 6 种松树 3-5 年生枝条树皮单宁和酚酸含量

Fig. 1 Tannin and phenolic acid contents in bark of 3-5-year-old branches of six pine species

图中数据为平均值±标准差，柱上不同小写字母表明在 0.05 水平显著差异（Duncan 氏检验）。图 2 同。

Data in the figure are mean±SD. Difference lowercase letters above bars indicate significant difference at the 0.05 level (Duncan's test). The same for Fig. 2.

分析酚类次生代谢物质含量，发现儿茶素、表儿茶素的含量占酚类物质总含量的 90%以上，是酚类代谢物总含量的决定性指标。单因素方差分析显示不同树种间儿茶素含量差异极显著（F=6.311, P<0.01），表儿茶素含量差异极显著（F=6.141, P<0.01）。事后多重比较显示，感性树种赤松、油松、黑松和黄山松的表儿茶素含量较抗性树种樟子松的低，黑松的表儿茶素含量与樟子松差异不显著（P>0.5）。樟子松的儿茶素和表儿茶素含量最高，儿茶素极显著高于赤松、黄山松和雪松（P<0.01）；樟子松表儿茶素极显著高于赤松、黄山松、油松和雪松（P<0.01），显著高于黑松（P<0.05）；赤松的儿茶素含量极显著低于黑松（P<0.01），儿茶素的含量与日本松干蚧抗性呈现正相关（图 2：A，B）。

2.2 6 种松树的挥发性物质分析

通过 GC-MS 分析，从 6 种松树的挥发物气体样品中共检测出包含烯烃类、萜类、醇类、醚类、苯丙素类、酮类、醛类、酯类、酸类、烷烃和芳香烃等 12 类化合物在内的 71 种化合物。其中以烯烃类化合物为主，其次为芳烃类、酯类、烷烃类和醛类，烯烃类化合物 19 种，烯烃类中

的萜类占 15 种，在 6 个树种中相对含量均为最大（图 3）。赤松中共鉴定出 39 种化合物，烯烃类有 11 种，其中萜类 10 种，相对百分含量为 47.14%；黑松中共鉴定出 36 种化合物，烯烃类有 9 种,其中萜类 8 种,相对百分含量为 23.71%；黄山松中共鉴定出 40 种化合物,烯烃类有 11 种，其中萜类 11 种，相对百分含量为 73.00%；雪松中共鉴定出 43 种化合物，烯烃类有 11 种，其中萜类 10 种，相对百分含量为 52.23%；油松中共鉴定出 38 种化合物，烯烃类有 10 种，其中萜类 8 种，相对百分含量为 23.71%；樟子松中共鉴定出 37 种化合物，烯烃类有 14 种，其中萜类 12 种，相对百分含量为 63.06%。在赤松的挥发物中，β-水芹烯、月桂烯、水芹烯分别占比为 32.74%、25.42%和 11.97%；在油松的挥发物中，β-水芹烯、左旋-β-蒎烯、月桂烯分别占比为 21.39%、7.13%和 6.76%；在黑松的挥发物中，β-水芹烯、水芹烯、二丁醚分别占比为 28.90%、10.96%和 9.35%；在黄山松的挥发物中，(+)-柠檬烯、月桂烯、α-蒎烯分别占比为 25.02%、23.20%和 11.11%；在雪松的挥发物中，(+)-柠檬烯、α-蒎烯、左旋-β-蒎烯分别占比为 18.38%、9.90%和 9.76%；在樟子松的挥发物中，(+)-柠檬烯、3-蒈烯、月桂烯分别占比为 23.57%、13.26%和 10.89%（表 1）。

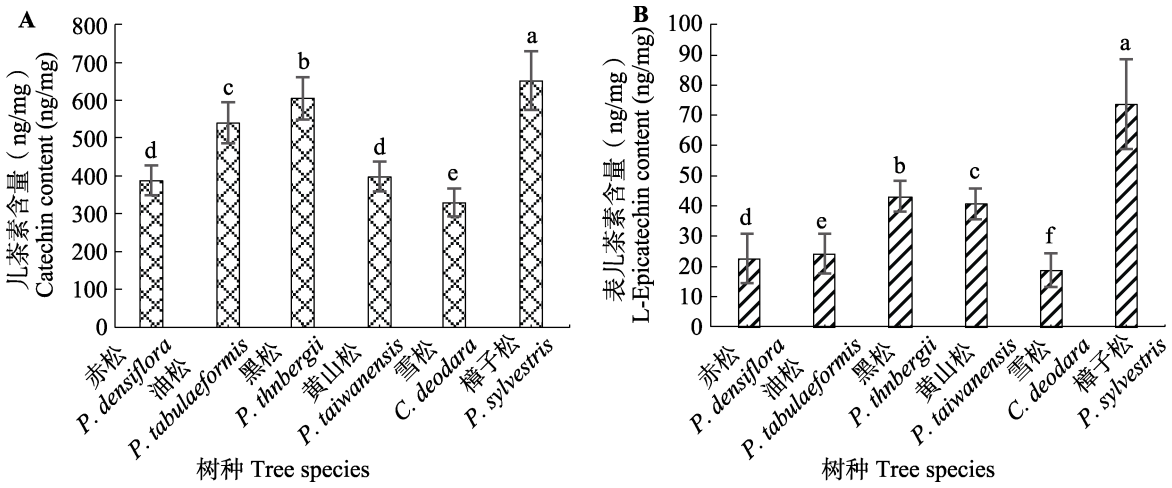


图 2　6 种松树 3-5 年生枝条树皮儿茶素（A）和表儿茶素（B）含量

Fig. 2　Catechin (A) and L-Epicatechin (B) contents in bark of 3-5-year-old branches of six pine species

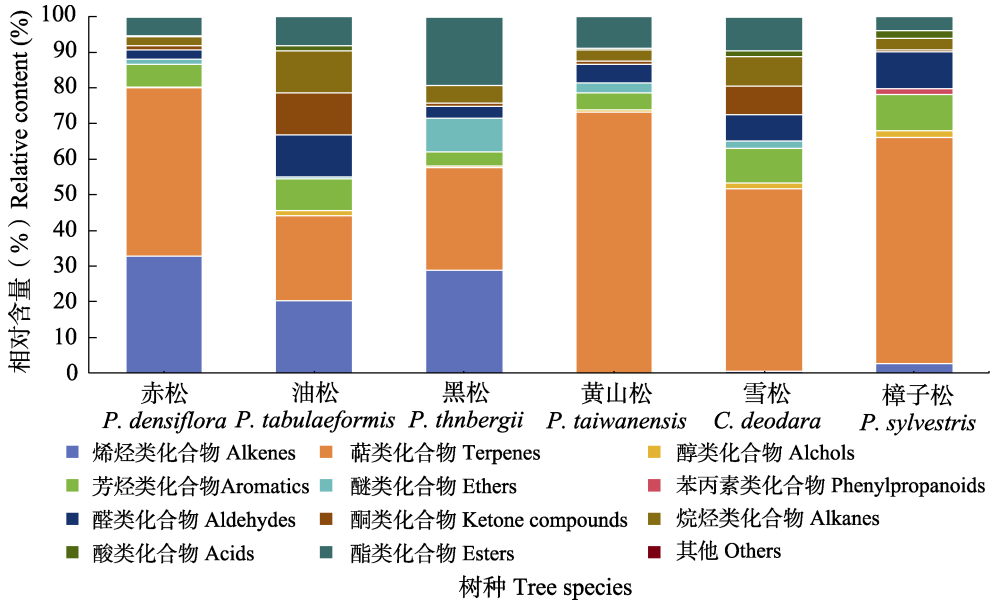


图 3　6 种松树 3-5 年生枝条挥发物相对含量

Fig. 3　Relative content of volatile organic compounds in bark of 3-5-year-old branches of six pine species

表 1　GC-MS 分析鉴定 6 种松树 3-5 年生枝条挥发性物质的成分和相对含量

Table 1　Compounds and relative contents of volatiles identified from 3-5-year-old branches of six pine species by GC-MS

化合物名称 Compounds	CAS 编号 CAS no.	不同松树枝条挥发性化合物含量（%） Content of volatiles from branches of different pine species (%)					
		赤松 *P. densiflora*	油松 *P. tabulaeformis*	黑松 *P. thnbergii*	黄山松 *P. taiwanensis*	雪松 *C. deodara*	樟子松 *P. sylvestris*
β-水芹烯 β-Phellandrene	555-10-2	32.736±2.520 b	21.385±1.753 a	28.899±3.115 b	-	-	-
1-辛烯 1-Octene	111-66-0	-	0.451±0.216 a	-	-	0.537±0.210 a	-
苯乙烯 Styrene	100-42-5	-	-	-	-	-	1.832±0.180 a
β-波旁烯 β-Bourbonene	5208-5-3	-	-	-	-	-	0.850±0.220 a
月桂烯 Myrcene	123-35-3	25.417±2.202 a	6.759±3.236 b	6.422±1.914 b	23.204±5.116 a	9.930±1.463 b	10.885±2.089 b
水芹烯 α-Phellandrene	99-83-2	11.970±1.286 b	1.939±0.307 a	10.963±3.866 b	3.381±1.346 a	1.929±0.567 a	-
萜品油烯 Terpinolene	586-62-9	4.230±1.980 a	2.198±1.062 a	3.710±0.730 a	1.572±0.533 a	1.393±0.428 a	2.608±1.243 a
左旋-β 蒎烯(1S)-(1)-β-Pinene	18172-67-3	2.007±0.008 c	7.130±0.180 b	2.140±0.450 c	5.720±2.070 b	9.758±0.940 a	3.048±0.361 c
α-蒎烯 α-Pinene	80-56-8	1.185±0.467 a	2.762±0.137 a	2.703±0.005 a	11.105±1.584 b	9.903±0.787 b	2.964±0.972 a
γ-松油烯 γ-Terpinene	99-85-4	1.035±0.067 c	-	1.375±0.350 abc	0.497±0.156 ab	0.448±0.233 a	1.359±0.273 ab
莰烯 Camphene	79-92-5	0.493±0.130 a	0.786±0.421 ab	1.133±0.502 abc	1.592±0.267 bc	1.738±0.386 c	1.461±0.136 bc
罗勒烯异构体混合物 Basilene isomer mixture	3338-55-4	0.454±0.167 a	1.648±0.323 b	-	0.432±0.067 a	0.365±0.044 a	0.657±0.034 a
(*E,E*) -2,6-二甲基-2,4,6-辛三烯 2,4,6-Octatriene,2,6-dimethyl-,(4E,6E)-	3016-19-1	0.230±0.030 a	-	-	0.184±0.070 a	-	-
长叶烯 Longifolene	475-20-7	0.117±0.015 a	0.484±0.128 a	0.995±0.300 b	0.293±0.062 a	0.386±0.024 a	-
(+)-柠檬烯(+)-Dipentene	5989-27-5	-	-	-	25.020±1.759 b	18.380±2.587 a	24.570±1.514 b
3-蒈烯 3-Carene	13466-78-9	-	-	-	-	-	13.255±2.107 a
γ-杜松烯 γ-Cadinene	39029-41-9	-	-	-	-	-	3.036±0.071 a
β-瑟林烯 β-Selinene	17066-67-0	-	-	-	-	-	0.569±0.055 a
α-杜松烯 α-Cadinene	24406-05-1	-	-	-	-	-	0.332±0.011 a
顺式-2-甲基乙酸环戊醇 Cyclopentanol, 2-methyl-, 1-acetate,(1R,2S)-rel-	40991-93-3	0.115±0.100 a	0.690±0.001 b	-	-	0.430±0.190 ab	0.775±0.410 b
正丁醇 1-Butanol	71-36-3	-	-	0.430±0.105 a	0.140±0.033 b	-	-
叶醇 Leaf alcohol	928-96-1	-	-	-	0.540±0.410 a	-	-
2,7-二甲基 2,6-辛烷-1-醇 2,7-Dimethyl-2,6-octadien-1-ol	22410-74-8	-	0.703±0.308 a	-	-	0.703±0.248 b	-
2,7,7-三甲基双环[2.2.1]庚烷-2-醇 Bicyclo[2.2.1]heptan-2-ol, 2,7,7-trimethyl-, endo-	3247-40-3	-	-	-	-	-	1.110±0.089 a

续表 1 (Table 1 continued)

化合物名称 Compounds	CAS 编号 CAS no.	不同松树枝条挥发性化合物含量（%） Content of volatiles from branches of different pine species (%)					
		赤松 *P. densiflora*	油松 *P. tabulaeformis*	黑松 *P. thnbergii*	黄山松 *P. taiwanensis*	雪松 *C. deodara*	樟子松 *P. sylvestris*
邻-异丙基苯 o-Cymene	527-84-4	4.400±0.448 ab	3.659±1.742 ab	-	1.868±0.021 a	2.140±0.001 a	5.290±1.253 b
2-甲氧基-4-甲基-1-(1-甲基乙基)苯 Benzene, 2-methoxy-4-methyl- 1-(1-methylethyl)-	1076-56-8	0.656±0.035 a	-	0.882±0.230 b	-	-	-
对二甲苯 p-Xylene	106-42-3	0.580±0.041 a	1.500±0.175 a	1.417±0.061 a	1.113±0.720 a	1.343±0.308 a	0.955±0.370 a
甲苯 Toluene	108-88-3	0.304±0.016 a	1.771±0.181 c	0.630±0.010 a	1.026±0.038 b	2.912±0.298 d	1.159±0.203 b
乙苯 Ethylbenzene	100-41-4	0.127±0.032 a	0.412±0.047 a	0.304±0.068 a	0.160±0.100 a	0.423±0.208 a	-
己基苯 Benzene, hexyl-	1077-16-3	-		0.710±0.019 a	0.720±0.131 a	2.440±0.198 b	-
间乙基甲苯 Benzene, 1-ethyl-3-methyl-	620-14-4	-	0.520±0.103a	-	-	0.520±0.290 b	-
1-甲基-4-(1-甲基乙烯基)苯 1-Methyl-4-(1-methylethenyl)-benzene	1195-32-0	-	-	-	-	-	1.844±0.224 a
1-异丙烯基-3-甲基苯 m,alpha-dimethylstyrene	1124-20-5	-	-	-	-	-	0.887±0.262 a
萘 Naphthalene	91-20-3	0.235±0.110 a	0.779±0.454 a	0.190±0.130 a	-	-	-
二丁醚 n-Butyl ether	142-96-1	1.599±0.416 a	0.443±0.228 a	9.354±2.996 b	2.991±0.081 a	2.069±0.291 a	-
1,2,4a,5,6,8a-六氢-4,7-二甲基-1-(1-甲基乙基)萘 1,2,4a,5,6,8a-Hexahydro-4,7-dimethyl-1-(1-methylethyl)napthtalene	31983-22-9	-	-	-	-	-	1.161±0.159 a
γ-木犀草碱 γ-Muurolene	30021-74-0	-	-	-	-	-	0.525±0.205 a
壬醛 Nonanal	124-19-6	0.875±0.216 a	5.018±1.192 c	0.971±0.346 a	0.536±0.116 a	0.905±0.415 a	3.090±0.130 b
正辛醛 Octanal	124-13-0	0.404±0.048 a	-	-	0.401±0.250 a	0.851±0.669 a	2.818±0.134 b
癸醛 Decanal	112-31-2	0.303±0.008 a	1.861±1.236 b	0.191±0.022 a	0.179±0.047 a	0.411±0.046 a	1.524±0.159 ab
苯甲醛 Benzaldehyde	100-52-7	0.300±0.060 a	1.275±0.045 b	0.529±0.204 a	0.331±0.010 a	0.585±0.036 a	0.971±0.646 ab
正己醛 Hexanal	66-25-1	0.260±0.020 a	2.396±0.346 c	1.093±0.072 b	2.994±0.630 bc	3.696±0.446 c	1.298±0.027 b
庚醛 Heptanal	111-71-7	0.200±0.090 a	1.343±0.307 c	0.411±0.223 ab	0.450±0.240 ab	0.919±0.261 bc	0.704±0.019 ab
戊醛 Pentanal	110-62-3	-	-	0.220±0.052 a	0.260±0.066 a	0.600±0.020 b	-
左旋樟脑 L(-)-Camphor	464-48-2	0.273±0.047 a	1.414±0.163 c	0.814±0.151 b	0.312±0.013 a	1.398±0.163 c	-
丙酮 Acetone	67-64-1	0.559±0.329 a	3.108±1.073 b	-	-	-	-
苯乙酮 Acetophenone	98-86-2	0.308±0.187 a	1.370±0.280 b	-	0.302±0.066 a	0.424±0.099 a	-
2-戊酮 2-Pentanone	107-87-9	-	-	-	0.170±0.136 a	0.260±0.110 b	-

续表 1 (Table 1 continued)

化合物名称 Compounds	CAS 编号 CAS no.	不同松树枝条挥发性化合物含量（%） Content of volatiles from branches of different pine species (%)					
		赤松 *P. densiflora*	油松 *P. tabulaeformis*	黑松 *P. thnbergii*	黄山松 *P. taiwanensis*	雪松 *C. deodara*	樟子松 *P. sylvestris*
环己酮 Cyclohexanone	108-94-1	-	3.210±2.685 a	-	-	5.960±0.049 b	-
十一烷 Undecane	1120-21-4	0.945±0.120 a	2.636±0.367 b	-	-	-	-
十二烷 Dodecane	112-40-3	0.755±0.104 a	3.556±1.844 b	-	0.231±0.016 a	0.397±0.041 a	-
癸烷 Decane	124-18-5	0.963±0.432 a	3.385±0.687 b	2.219±1.356 ab	0.316±0.018 a	-	-
十四烷 Tetradecane	629-59-4	0.140±0.010 a	0.980±0.085 c	-	-	0.350±0.070 ab	0.397±0.158 b
2,6,11-三甲基十二烷 Dodecane, 2,6,11-trimethyl-	31295-56-4	0.100±0.004 a	0.631±0.021 b	-	-	-	-
正丁烷 Butane	106-97-8	-	-	0.364±0.002 a	-	-	-
异戊烷 Butane, 2-methyl-	78-78-4	-	-	0.340±0.126 a	0.970±0.323 a	3.070±1.050 b	1.010±1.002 a
十三烷 Tridecane	629-50-5	-	-	1.116±0.114 a	-	-	-
3-甲基壬烷 Nonane, 3-methyl-	1465084	-	-	0.181±0.139 a	-	-	-
异丁烷 Isobutane	75-28-5	-	-	-	0.997±0.043 a	-	-
1,7,7-三甲基三环[2.2.1.0(2,6)]庚烷 Tricyclo[2.2.1.0(2,6)]heptane, 1,7,7-trimethyl-	508-32-7	-	-	-	0.227±0.073 a	-	-
正戊烷 Pentane	109-66-0	-	-	-	-	2.597±0.522 a	1.342±0.306 b
3,5-二甲基辛烷 Octane, 3,5-dimethyl-	15869-93-9	-	0.710±0.077 a	-	-	0.710±0.049 b	-
2,7,10-三甲基十二烷 Dodecane, 2,7,10-trimethyl-	74645-98-0	-	0.500±0.140 a	-	-	0.500±0.100 b	-
乙酸 Acetic acid	64-19-7	0.171±0.030 a	1.408±0.178 bc	-	0.867±0.439 b	1.718±0.097 c	1.268±0.353 bc
2-己基环丙烷乙酸 2-Hexyl-1-cyclopropaneacetic acid	35936-15-3	-	-	-	-	-	0.824±0.192 a
丙烯酸正丁酯 Butyl acrylate	141-32-2	2.596±1.024 a	-	12.714±1.203 c	5.481±0.960 b	-	-
丁二酸二乙酯 Diethyl succinate	123-25-1	1.114±1.083 a	5.578±2.478 b	0.341±0.096 a	1.052±0.611 a	1.953±0.060 a	2.900±0.289 a
乙酸丁酯 Butyl acetate	123-86-4	0.434±0.178 a	-	2.390±0.131 b	-	-	-
乙酸乙酯 Ethyl acetate	141-78-6	0.420±0.055 a	3.163±1.594 b	0.568±0.397 a	2.056±0.691 ab	7.350±1.140 c	1.486±0.500 ab
丙酸丁酯 Butylpropanoate	590-01-2	0.277±0.088 a	-	1.238±0.087 a	0.858±0.616 a	0.631±0.611 a	-
丁酸丁酯 n-Butyl butanoate	109-21-7	-	-	0.837±0.601 a	-	-	-
其他 Others	-	0.173±0.187 a	0.435±0.055 a	0.241±0.045 a	0.532±0.271 a	0.497±0.314 a	2.202±3.117 a

“-”表示未检测到该物质。表中数据为平均数±标准差。同行不同小写字母表示经 Tukey 法检验差异显著（P<0.05）。

The dash (-) indicates that the compound had not been detected in the volatiles. Data are mean±SD, and followed by different lowercase letters in the same line indicate significant difference by Tukey test (P<0.05).

自然状态下，检测到主要抗性树种樟子松、雪松的挥发物中的单萜类有机化合物远高于日本松干蚧主要寄主树种赤松和油松，樟子松、雪松的挥发物中有赤松、油松所没有的单萜类化合物 (+)- 柠檬烯，且含量较高，分别为 24.57%±1.51%和 18.38%±2.59%；单因素方差分析显示，莰烯的相对含量在樟子松（1.46%±0.14%）、雪松（1.74%±0.39%）中也极显著高于赤松（0.49%±0.13%）和油松（0.79%±0.42%）（F=6.239, P<0.01）；樟子松中 3-蒈烯相对含量为 13.26%±2.107%，其他树种挥发物中未检出；此外，樟子松挥发物中的特有物质还有 γ-杜松烯（3.04%±0.07%）、苯乙烯（1.83%±0.18%）、1,2,4a,5,6,8a-六氢-4,7-二甲基-1-（1-甲基乙基）萘（1.16%±0.16%）、2,7,7-三甲基双环[2.2.1]庚烷-2-醇（1.11%±0.09%）、β-波旁烯（0.85%±0.22%）、β-瑟林烯（0.57%±0.06%）、γ-木犀草碱（0.525%）和 α-杜松烯（0.33%±0.01%）等化合物；感性树种赤松、油松和黑松中的 β-水芹烯相对含量较高，分别为 32.74%±2.52%、21.38%±1.76% 和 28.9%±3.12%，而在雪松和樟子松中均未检出；单因素方差分析显示，赤松中的月桂烯相对含量（25.42%±2.2%）极显著高于雪松（9.93%±1.46%）和樟子松（10.88%±2.09%）（F=24.52, P<0.01）；赤松和黑松中水芹烯相对含量为 11.97%±1.29%、10.96%±3.87%，在樟子松中未检出（表 1）。

3　讨论

单宁作为有效的化学防御物质，能促使蛋白质鞣化、抑制酶活性或与蛋白质、淀粉络合，损伤植食性昆虫幼虫的肠壁细胞，使植食性昆虫营养不良，对某些植食性昆虫具有毒性（覃春华等，2011）；还可结合唾液蛋白并沉淀，使植物组织口感变粗糙苦涩，减少植食性昆虫的取食频率（刘敏等，2021）。酚酸作为重要的次生抗虫化合物，对昆虫具有抗生作用，含量与一些植食性昆虫的数量呈明显的负相关。研究发现，植物总酚含量的增加是构成对植食性昆虫抗性提高的主要原因（许建鹏等，2016）。李镇宇等（1997）研究了樟子松与油松针叶中酚酸含量的变化。结果表明，樟子松针叶中总的酚酸含量比油松高出 0.58 倍，其中咖啡酸高出 3.70 倍，导致赤松毛虫 *Dendrolimus spectabilis* 不倾向在樟子松上产卵。茶树叶片中的儿茶素含量是鉴定茶树品种是否为灰茶尺蠖 *Ectropis grisescens* 抗性品种的指示性指标（孙晓玲等，2023）。本研究发现日本松干蚧主要寄生的 3-5 年生枝条树皮内的单宁和酚酸，尤其是儿茶素和表儿茶素与树种抗性呈正相关，可以将其作为是否是日本松干蚧抗性树种的指示性指标。

植食性昆虫主要通过高度敏感的嗅觉系统检测到植物挥发性次生代谢物质，进而选择接近或者避开寄主（赵冬香等，2004；Bruce and Pickett，2011），在协同进化过程中，植物也利用一些挥发性物质来引诱天敌昆虫、驱避植食性昆虫，这些植物挥发物的有效成分在生物防治中有重要作用，萜烯类化学物质的大量释放是针叶树最重要的防御措施之一（任琴等，2005）。本研究结果显示，6 种寄主植物挥发物的共有组分为月桂烯、萜品油烯、莰烯、左旋-β-蒎烯和 2-蒎烯等，而(+)-柠檬烯、莰烯、3-蒈烯、γ-杜松烯为抗性树种挥发物中的特异组分。这些共有组分或特异组分均属于萜烯类物质，抗性树种的萜烯类化合物总相对含量显著高于感性树种。多数萜烯类化合物对昆虫的进食及产卵行为展现出诱集或刺激效应（王景顺等，2015）。研究表明，松树中萜烯类成分含量变化与横坑切梢小蠹 *Tomicus minor* 为害之间存在关联，3-蒈烯和柠檬烯的产生可减少害虫小蠹为害松树（吴东山等，2021）。经过冷压技术从橘皮中提取出来的 D-柠檬烯是常见的植物源杀虫杀菌和保鲜剂，是番茄烟粉虱 *Bemisia tabaci* 杀虫剂的有效成分（王树彬，2022），5%的柠檬烯对害虫具有有效的控制效果（刘刚，2018）。D-柠檬烯对天牛的寄生天敌花绒寄甲 *Dastarcus helophoroides* 具有引诱作用（焦胜双，2019），但对鞘翅目害虫具有驱避作用。施用莰烯的落叶松树苗对落叶松毛虫 *Dendrolimus superans* 的趋避作用显著（林健等，

2014）。3-蒈烯对美国白蛾 *Hyphantria cunea* 有趋避作用，同时能够通过与嗅觉结合蛋白 CcOBP2 结合，触发嗅觉反应吸引天敌昆虫白蛾周氏啮小蜂 *Chouioia cunea*，可作为生物防治药剂的主要成分（潘丽娜等，2020）。南瓜中的挥发性 3-蒈烯对棕榈蓟马 *Thrips palmi* 趋避性最强（吴密，2019）。菊花在胁迫条件下挥发性萜烯 γ-杜松烯、β-水芹烯增加，提高了对斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* 幼虫的抗性（许媚琳，2021）。茨烯与月桂烯对红脂大小蠹 *Dendroctonus valens* 的行为具有刺激作用（刘敏等，2021）。烟粉虱诱导的月桂烯能够调控番茄间信息传递，降低邻近番茄植株的抗虫性，促进其种群快速繁殖（傅意茗，2022）。根据本研究结果，需进一步利用 EAG、“Y”型嗅觉仪、林间试验等对特异性挥发物进行分析，找出其具有引诱和驱避的化合物和有效配比及防治方式。同时，研究表明，昆虫对寄主的选择由嗅觉、视觉和味觉共同参与（安新城和任顺祥，2007），不同环境气候条件、土壤条件都会影响昆虫对寄主植物的选择（陈静，2010）。且昆虫在近距离寻找寄主植物时，除挥发物性有机化合物以外，寄主被寄生部位的物理结构特性和营养物质含量等也会对昆虫的寄主选择产生影响（文超等，2020），本次试验样本量和地域范围有限，未来将继续深入研究，从多角度探究日本松干蚧的寄主选择机制。

参考文献 (References)

An XC, Ren SX, 2007. Host selection behavior of *Bemisia tabaci*. *Chinese Bulletin of Entomology*, 44(4): 566–570. [安新城, 任顺祥, 2007. 烟粉虱对寄主的选择行为. 昆虫知识, 44(4): 566–570.]

Bruce TJA, Pickett JA, 2011. Perception of plant volatile blends by herbivorous insects: Finding the right mix. *Phytochemistry*, 72(13): 1605–1611.

Chai XM, 1999. Predatory natural enemies of *Matsucoccus matsumurae* and their population dynamics. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 16(4): 8–12. [柴希民, 1999. 日本松干蚧的捕食性天敌及其数量动态. 浙江林学院学报, 16(4): 8–12.]

Chen J, 2010. Influence of environmental conditionand physiological basis on the hostplant selection by beet webworm, *Loxostege sticticalis* (Lepidoptera: Pyralidae). Master dissertation. Hainan: Hainan University. [陈静, 2010. 环境条件与生理基础对草地螟寄主选择性的影响. 硕士学位论文. 海南: 海南大学.]

Dai JQ, Han SC, Du JW, 2010. The role of plant volatile info-chemicals in insect host selection behavior. *Journal of Environmental Entomology*, 32(3): 407–414. [戴建青, 韩诗畴, 杜家纬, 2010. 植物挥发性信息化学物质在昆虫寄主选择行为中的作用. 环境昆虫学报, 32(3): 407–414.]

Foldi I, 2004. The Matsucoccidae in the Mediterranean basin with a world list of species (Hemiptera: Sternorrhyncha: Coccoidea). *Annales de la Société Entomologique de France* (*Natural Science*), 40(2): 145–168.

Fu YM, 2022. Molecular mechanism of tomato insect-resistant defense response regulated by myrcene induced by *Bemisia tabaci*. Master dissertation. Hangzhou: China Jiliang University. [傅意茗, 2022. 烟粉虱诱导月桂烯调控番茄抗虫防御反应的分子机制研究. 硕士学位论文. 杭州: 中国计量大学.]

Ge F, 2016. Supplementary quarantine objects and measures for forest plants in Liaoning Province. *Liaoning Forestry Science and Technology*, 2016(2): 54–55, 73. [葛芳, 2016. 辽宁省补充森林植物检疫对象及检疫措施. 辽宁林业科技, 2016(2): 54–55, 73.]

Heath RR, Landolt PJ, Dueben B, Lenczewski B, 1992. Identification of floral compounds of night-blooming jessamine attractive to cabbage looper moths. *Environmental Entomology*, 21(4): 854–859.

Hu JH, 1998. Chemical defense between higher plants and insects. *Biology Bulletin*, 33(8): 20–22. [胡家会, 1998. 高等植物与昆虫的化学防卫. 生物学通报, 33(8): 20–22.]

Huo YL, Li GW, Zhang WM, 1983. Preliminary investigation on the natural enemy of *Matsucoccus matsumurae-Formica fusca*. *Natural Enemies of Insects*, 1983(4): 243–245. [霍玉林, 李广武, 张文明, 1983. 松干蚧天敌——黄褐情蚁初步调查. 昆虫天敌, 1983(4): 243–245.]

Jiao SS, 2019. Analysis of chemical cues used by first-instar larvae of *Dastarcus helophoroides* to locate *Anoplophora glabripennis*. Master dissertation. Tai'an: Shandong Agricultural University. [焦胜双, 2019. 花绒寄甲 1 龄幼虫定位光肩星天牛的化学信息物质分析. 硕士学位论文. 泰安: 山东农业大学.]

Li G, Yu JX, Miao LG, 2016. Investigation on new host plants of *Matsucoccus matsumurae*. *Forest By-Products and Specialties in China*, 2016(1): 70–72. [李刚, 于建新, 苗利国, 2016. 日本松干蚧新寄主植物调查. 中国林副特产, 2016(1): 70–72.]

Li ZY, Li K, Zhou Q, Wang HQ, Yan PL, Li JC, Ma ML, Zhang GL, 1997. Introduction of *Pinus sylvestris* in Qinhuangdao region and its resistance analysis to *Dendrolimus spectabilis*. *Journal of Beijing Forestry University*, 19(4): 41–46. [李镇宇, 李凯, 周青,

王会强, 阎佩林, 李加纯, 马茂林, 张国林, 1997. 秦皇岛地区樟子松引种及其对赤松毛虫抗性分析. 北京林业大学学报, 19(4): 41–46.]

Lin J, Liu WB, Meng ZJ, Yan SC, 2014. Effects of sustained-release monoterpene volatiles on the behavior of *Dendrolimus superans* and major defense proteins in *Larix*. *Acta Ecologica Sinica*, 34(11): 2978–2985. [林健, 刘文波, 孟昭军, 严善春, 2014. 缓释单萜类挥发物对落叶松毛虫行为及落叶松主要防御蛋白的影响. 生态学报, 34(11): 2978–2985.]

Liu G, 2018. d-Limonene shows good field control effect against *Panonychus citri*. *Agrochemical Market News*, 2018(14): 45. [刘刚, 2018. d-柠檬烯对柑橘全爪螨田间防治效果较好. 农药市场信息, 2018(14): 45.]

Liu M, Liu YJ, Fu NN, Xu Q, Liu YS, Ren LL, Luo YQ, 2021. Analysis of volatiles from seven conifer species and effects of main terpenois on the behavior responses of *Dendroctonus valens*. *Journal of Environmental Entomology*, 43(1): 48–59. [刘敏, 刘宇杰, 付宁宁, 徐强, 刘玉山, 任利利, 骆有庆, 2021. 7 种松树挥发物分析及其主要萜烯类物质对红脂大小蠹行为选择的影响. 环境昆虫学报, 43(1): 48–59.]

Liu WM, Xie YP, Xue JL, Zhang YF, Tian F, Yang Q, Wu J, Tang XJ, Geng YL, Zhang YW, Zhao CS, 2015. Morphology, behavior and natural enemies of *Matsucoccus matsumurae* (Homoptera: Matsucoccidae) during development. *Scientia Silvae Sinicae*, 51(7): 69–83. [刘卫敏, 谢映平, 薛皎亮, 张艳峰, 田芬, 杨钤, 吴俊, 唐喜军, 耿以龙, 张英伟, 赵常胜, 2015. 日本松干蚧(同翅目: 松干蚧科)发育过程中形态、习性及天敌. 林业科学, 51(7): 69–83.]

Liu WM, Xie YP, Dong J, Xue JL, Zhang YF, Lu YB, Wu J, 2014. Pathogenicity of three entomopathogenic fungi to *Matsucoccus matsumurae*. *PLoS ONE*, 9(7): e103350.

Pan LN, Li M, Xiang WF, Yang YX, Han JY, Zhu GP, 2020. Application of a terpene compound in the biological control of *Hyphantria cunea*. Chinese patent, invention patents authorizat, CN201910321286.6. 2020-11-10. [潘丽娜, 李敏, 相伟芳, 杨艺新, 韩佳怡, 朱耿平, 2020. 一种萜烯类化合物在美国白蛾生物防治中的应用. 中国专利, 发明授权, CN201910321286.6. 2020-11-10.]

Qin CH, Li JH, Chen YD, Chen T, Zhao YG, Li YH, 2011. Effects of host plants and their secondary substances on *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae). *Hubei Agricultural Sciences*, 50(23): 4767–4770. [覃春华, 李建洪, 陈永德, 陈涛, 赵玉纲, 李永辉, 2011. 寄主及其次生物质对斜纹夜蛾的影响. 湖北农业科学, 50(23): 4767–4770.]

Ren GJ, Qu YY, Wang MX, Wu HW, Wang J, Ma AB, Zhang XW, 2024. Research progress on biological control of *Matsucoccus matsumurae*. *Shandong Forestry Science and Technology*, 54(1): 114–119. [任广娟, 曲永赟, 王孟筱, 武海卫, 王静, 马安宝, 张新慰, 2024. 日本松干蚧生物防治研究进展. 山东林业科技, 54(1): 114–119.]

Ren Q, 2006. Study on the rapid induced resistance and chemical signal substances of *Pinus massoniana*. Doctor dissertation. Beijing: Beijing Forestry University. [任琴, 2006. 马尾松快速诱导抗性及化学信号物质的研究. 博士学位论文. 北京: 北京林业大学.]

Ren Q, Li ZY, Hu YJ, Jin YJ, Chen HJ, 2005. Emission of volatile chemical substances from damaged *Pinus massoniana* and *Pinus elliottii*. *Acta Ecologica Sinica*, 25(11): 136–140. [任琴, 李镇宇, 胡永建, 金幼菊, 陈华君, 2005. 受害马尾松、湿地松挥发性化学物质的释放. 生态学报, 25(11): 136–140.]

Ren WH, Zhao HG, 2018. Biological characteristics and control methods of *Matsucoccus matsumurae*. *Agriculture and Technology*, 38(22): 198. [任卫红, 赵恒刚, 2018. 日本松干蚧的生物学特性及防治方法. 农业与技术, 38(22): 198.]

Ren XM, Xu ZW, Yang B, Zhan MK, Lu JF, Sun YR, 2024. Isolation and identification of a pathogenic fungus infecting *Matsucoccus matsumurae*. *Journal of Southwest Forestry University* (*Natural Sciences*), 44(1): 200–207. [任雪敏, 徐志文, 杨斌, 展茂魁, 路纪芳, 孙亚茹, 2024. 一株侵染日本松干蚧的病原真菌的分离及鉴定. 西南林业大学学报(自然科学), 44(1): 200–207.]

Ren XM, Xu ZW, Zhao B, Lu JF, Chen B, Zhan MK, 2022. Research progress on the prevention and control of *Matsucoccus matsumurae*. *Biological Disaster Science*, 45(4): 379–386. [任雪敏, 徐志文, 赵斌, 路纪芳, 陈波, 展茂魁, 2022. 日本松干蚧防治研究进展. 生物灾害科学, 45(4): 379–386.]

Shi W, Liu H, Ye H, 2010. Behavioral response of *Bactrocera dorsalis* to five kinds of odor volatile of mango. *Chinese Bulletin of Entomology*, 47(2): 318–321. [施伟, 刘辉, 叶辉, 2010. 桔小实蝇对五种芒果气味挥发性物质的行为反应. 昆虫知识, 47(2): 318–321.]

Song XH, 2021. Study on the resistance of different provenances of *Pinus sylvestris* to *Dioryctria mendax*. Master dissertation. Harbin: Northeast Forestry University. [宋效惠, 2021. 不同种源樟子松对樟子松梢斑螟抗性研究. 硕士学位论文. 哈尔滨: 东北林业大学.]

Sun JH, Roques A, Yan SC, 2000. Pest behavior regulation and forest pest management. *World Forestry Research*, 13(2): 6. [孙江华, Roques A, 严善春, 2000. 害虫行为调节与森林害虫管理. 世界林业研究, 13(2): 6.]

Sun XL, Li XW, Xing YX, Yu YC, 2023. A method for rapidly identifying tea plant varieties resistant to *Ectropis grisescens* using catechins. Chinese patent, invention patents authorizat, CN202111273574.2. 2023-07-18. [孙晓玲, 李喜旺, 邢玉娴, 于永晨, 2023. 一种利用儿茶素快速鉴定灰茶尺蠖抗性茶树品种的方法. 中国专利, 发明授权, CN202111273574.2. 2023-07-18.]

Sun XL, Li GW, Wang AM, 1985. Study on the origin and population dynamics of *Matsucoccus matsumurae* in Qingyang County, Anhui Province. *Forestry Science and Technology Communications*, 1985(6): 25–27. [孙锡麟, 李广武, 王安民, 1985. 安徽青阳县日本松干蚧的来源及种群动态的研究. 林业科技通讯, 1985(6): 25–27.]

Sun XL, Li GW, 1982. Research and control of pine scale at home and abroad. *Forestry Practical Technology*, 1982(11): 31–34. [孙锡麟, 李广武, 1982. 国内外松干蚧研究与防治. 林业实用技术, 1982(11): 31–34.]

Tian MJ, 2021. Study on the biological habits and suitable habitat prediction of *Matsucoccus matsumurae* in Guizhou. Master dissertation. Guizhou: Guizhou University. [田茂娟, 2021. 日本松干蚧在贵州的生物学习性及适生区预测研究. 硕士学位论文. 贵州: 贵州大学.]

Wang JS, Wu QF, Lu ZF, 2015. Research progress on plant secondary metabolites and insect resistance of trees. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 43(8): 4–7. [王景顺, 吴秋芳, 路志芳, 2015. 植物次生代谢物与林木抗虫性研究进展. 江苏农业科学, 43(8): 4–7.]

Wang SB, 2022. Preliminary study on synthesis of terpene volatiles from tomato leaves mediated by exogenous caryophyllene. Master dissertation. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University. [王树彬, 2022. 外源石竹烯介导番茄萜类挥发物合成的初步探究. 硕士学位论文. 福州: 福建农林大学.]

Wen C, Ma T, Wang C, Liang SP, Zhu Y, Wen JB, Wen XJ, 2020. The role of visual signals in insect detection of plant hosts. *Journal of Environmental Entomology*, 42(3): 607–614. [文超, 马涛, 王偲, 梁仕萍, 朱映, 温俊宝, 温秀军, 2020. 视觉信号在昆虫检测植物寄主中的作用. 环境昆虫学报, 42(3): 607–614.]

Wu DS, Jia J, Chen H, Yan PD, Xu RX, Yang LQ, Yang ZQ, 2021. Analysis of induced resistant volatile compounds in *Pinus yunnanensis* var. *tenwifolia* damaged by *Tomicus minor* (Coleoptera: Scolytidae) by HS-SPME-GC/MS method. *Scientia Silvae Sinicae*, 57(6): 103–110. [吴东山, 贾婕, 陈虎, 颜培栋, 徐荣勋, 杨柳琴, 杨章旗, 2021. 利用 HS-SPME-GC/MS 法分析横坑切梢小蠹危害细叶云南松诱导抗性挥发物质. 林业科学, 57(6): 103–110.]

Wu M, 2019. Study on the induced resistance of *Cucurbita moschata* against *Thrips palmi*. Master dissertation. Nanning: Guangxi University. [吴密, 2019. 南瓜对棕榈蓟马的诱导抗性研究. 硕士学位论文. 南宁: 广西大学.]

Xu JP, Gu TT, Liu YY, Li TT, Jiang WZ, Liu GJ, Cao CX, 2016. Study on resistance of different cucumber materials to *Bemisia tabaci* and related enzyme activities. *Shandong Agricultural Sciences*, 48(9): 65–68. [许建鹏, 谷停停, 刘永月, 李田田, 姜文芝, 刘桂军, 曹辰兴, 2016. 不同黄瓜材料对烟粉虱的抗性及相关酶活性的研究. 山东农业科学, 48(9): 65–68.]

Xu ML, 2021. Indirect defense mechanism of volatile terpenes in Chrysanthemum against *Spodoptera litura* larvae. Master dissertation. Nanjing: Nanjing Agricultural University. [许媚琳, 2021. 菊花中挥发性萜烯介导对斜纹夜蛾幼虫的间接防御机制. 硕士学位论文. 南京: 南京农业大学.]

Yang Q, Xie YP, Fan JH, Shao SF, Wu J, Wang YS, Zhao CS, Zhang YW, 2013. Genetic differentiation of *Matsucoccus matsumurae* from three geographic populations in China. *Scientia Silvae Sinicae*, 49(12): 88–96. [杨钤, 谢映平, 樊金华, 邵生富, 吴俊, 王彦士, 赵常胜, 张英伟, 2013. 日本松干蚧 3 个地理种群的遗传分化. 林业科学, 49(12): 88–96.]

Zhang JY, Lin KJ, Huang XZ, Geng T, Wei HY, Zhang YJ, 2016. EAG responses and taxis selection of green plant bug *Apolygus lucorum* to volatiles from seven species of kinds of Malvaceae plants. *Chinese Journal of Biological Control*, 32(2): 135–141. [张俊宇, 林克剑, 黄欣蒸, 耿亭, 魏洪义, 张永军, 2016. 绿盲蝽对七种锦葵科植物挥发物的 EAG 和趋向行为反应. 中国生物防治学报, 32(2): 135–141.]

Zhao DX, Gao JL, Chen ZM, 2004. Advances in research on the orientation behavior of phytophagous insects towards host plants. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 24(2): 62–68. [赵冬香, 高景林, 陈宗懋, 2004. 植食性昆虫对寄主植物的定向行为研究进展. 热带农业科学, 24(2): 62–68.]

Zhou Q, Liang GW, 2001. The role of plant volatiles in host location by aphids. *Entomological Knowledge*, 38(5): 334–336. [周琼, 梁广文, 2001. 植物挥发性物质在蚜虫寄主定位中的作用. 昆虫知识, 38(5): 334–336.]

Zhuge PP, Luo SL, Wang MQ, Zhang G, 2010. Electrophysiological responses of *Batocera horsfieldi* (Hope) adults to plant volatiles. *Journal of Applied Entomology*, 134(7): 600–607.