环境昆虫学报 2021，43（1）：48－59
Journal of Environmental Entomology
http：//hjkcxb. alljournals. net
doi：10. 3969/j. issn. 1674－0858. 2021. 01. 6

刘敏，刘宇杰，付宁宁，徐强，刘玉山，任利利，骆有庆. 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[J]. 环境昆虫学报，2021，43（1）：48－59.

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

刘　敏，刘宇杰，付宁宁，徐　强，刘玉山，任利利，骆有庆*
（北京林业大学，北京 100083）

摘要： 入侵种红脂大小蠹在我国逐渐向北扩散至内蒙古和辽宁等地。同时在林间发现，相对于油松 *Pinus tabuliformis*，其更偏好危害樟子松 *Pinus sylvestris* var. *mongolica*。本文主要分析我国7种松树挥发性物质以及新发生地红脂大小蠹对其中主要物质的行为选择。本研究采用动态顶空采样法和气相色谱——质谱联用技术（GC-MS），对7种松树树干木段挥发性有机化合物（VOCs）进行采集和分析，包括油松、樟子松、华山松 *Pinus armandii*、白皮松 *Pinus bungeana*、马尾松 *Pinus massoniana*、红松 *Pinus koraiensis* 和落叶松 *Larix gmelinii*。在此基础上参考以往研究中与红脂大小蠹行为相关的化合物，选择树种挥发物中7种主要烯烃类化合物：（1R）-（+）-α-蒎烯、（+）-3-蒈烯、（-）-β-蒎烯、月桂烯、（S）-（-）-柠檬烯，萜品油烯和莰烯，通过自制十通道行为仪器进行嗅觉反应试验，分析红脂大小蠹在不同浓度的化合物刺激下的行为选择反应。GC-MS结果表明，7种松树树干释放化合物中共包含烯烃类、醇类、酮类、醛类、酯类、酸类、烷烃和芳香烃8类化合物在内的54种化合物，其中烯烃类化合物相对含量最高。主成分分析及聚类分析结果表明，红脂大小蠹以往偏好寄主油松与新偏好寄主樟子松的挥发物相似度最高，（+）-3-蒈烯为其特有的挥发性物质，莰烯含量高于其他树种；4种受害寄主树种（油松、樟子松、白皮松和华山松）挥发性物质相似，均含有高比例的α-蒎烯，同时有β-蒎烯、柠檬烯、萜品油烯。选择上述6种化合物及月桂烯（华山松、白皮松中共有的萜烯类化合物）进行行为选择反应。结果显示，受害寄主树种中含有β-蒎烯以及油松、樟子松中的特征性挥发物质（+）-3-蒈烯对雌虫具有明显的吸引作用，低浓度（-）-柠檬烯（10^{-4} mg/mL）对雄虫具有吸引作用；低浓度（10^{-4} mg/mL）月桂烯对雌虫以及中浓度（10^{-2} mg/mL）莰烯对雌雄成虫具有刺激性。综上所述，本研究证明了红脂大小蠹的寄主选择行为趋性与寄主树干挥发物的组成和含量有关。本试验结果将有助于理解植物挥发物对红脂大小蠹偏好寄主选择的影响，并进一步开发红脂大小蠹的引诱剂和趋避剂以应用于其防治。

关键词： 红脂大小蠹；寄主树种；挥发物；烯烃类成分；行为反应
中图分类号： Q968.1；S433　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1674－0858（2021）01－0048－12

Analysis of volatiles from seven conifer species and effects of main terpenois on the behavior responses of *Dendroctonus valens*

LIU Min，LIU Yu-Jie，FU Ning-Ning，XU Qiang，LIU Yu-Shan，REN Li-Li，LUO You-Qing*（Beijing Forestry University，Beijing 100083，China）

Abstract: The invasive species，*Dendroctonus valens* LeConte has gradually spread northward in China to Inner Mongolia and Liaoning Province recently. At the same time，it was found that *D. valens* preferred to

基金项目： 国家自然科学基金（31870642）；北京市科技计划项目（Z191100008519004）；国家重点研发计划项目（2018YFD0600200）
作者简介： 刘敏，女，1996年生，山西人，硕士研究生，从事有害生物化学生态学研究，E－mail：liumin17@bjfu.edu.cn
* **通讯作者** Author for correspondence：骆有庆，男，博士，教授，主要研究方向为林木钻蛀性害虫生态调控和林业外来有害生物防控，E－mail：youqingluo@126.com
收稿日期 Received：2020－02－04；**接受日期** Accepted：2020－05－14

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

damage *Pinus sylvestris* var. *mongolica* than *P. tabulaformis*. This paper mainly explored the volatile organic compounds (VOCs) of seven conifer tree trunks and the behavioral choices of *D. valens* in Inner Mongolia for their main terpenes volatiles. The volatile organic compounds in seven conifer tree trunks, including *P. tabuliformis*, *P. sylvestris* var. *mongolica*, *P. massoniana*, *P. bungeana*, *P. armandii*, *P. koraiensis*, *Larix gmelinii* were collected using dynamic headspace air-circulation method. Then the constituents and relative contents were identified with gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). With reference to the compounds related to the behavior of *D. valens* in previous studies, seven compounds with relatively high contents ((1R)-(+)-α-pinene, (+)-3-carene, (-)-β-pinene, myrcene, terpineol, (S)-(-)-limonene, camphene) were selected. Self-made behavioral olfactometer was used for behavioral responses tests. GC-MS results showed that the seven conifer tree trunk release compounds include a total of 54 compounds, that belong to olefins, alcohols, ketones, aldehydes, esters, acids, alkanes, and aromatics. Among those eight compound groups, the group of olefins was the highest. The principal component analysis and cluster analysis results showed that the similarity of volatiles between the previous preferred host *P. tabuliformis* and the new preferred host *P. sylvestris* var. *mongolica* was the highest, and (+)-3-pinene was their unique volatile substance, the content of camphene was higher than other tree species. The volatile organic compounds of the four host species (*P. tabuliformis*, *P. sylvestris*, *P. bungeana*, *P. armandii*) of *D. valens* were similar. They all contained a high proportion of α-pinene, β-pinene, limonene, terpinolene. We selected the above six compounds and myrcene (terpenes compounds common in *P. armandi* and *P. bungeana*) for behavior tests. Behavioral response results showed that β-pinene and (+)-3-pinene had obvious attraction to female adults, and low-concentration (10^{-4} mg/mL) limonene had attractive effect on males. Low concentration (10^{-4} mg/mL) myrcene was irritating to females and medium-level (10^{-2} mg/mL) camphene was irritating to male and female adults. In summary, we concluded that the host selectivity of *D. valens* was related to the composition and content of the trunk volatiles. The results of this experiment would help to understand the influences of plant volatiles on the host perference of *D. valens* and further developing the attractants and repellent agents of *D. valens*.

Key words: *Dendroctonus valens*; conifer species; volatiles; terpenois; behavioral response

红脂大小蠹 *Dendroctonus valens* LeConte，又称强大小蠹，属鞘翅目 Coleoptera 小蠹科 Scolytidae，原产于北美洲，传入我国后，对油松 *Pinus tabuliformis* 造成严重危害，是一种重大的外来入侵生物。红脂大小蠹在北美洲原产地分布在北纬 15°~55°，包括美国、加拿大和墨西哥、洪都拉斯和危地马拉（苗振旺等，2000；高宝嘉等，2003；Yan *et al.*，2005）。在原产地属于次期性害虫，主要侵害长势衰弱或被其他病虫害危害过的树木（潘杰等，2011），受害针叶树包括松科的松属 *Pinus*、云杉属 *Picea*、黄杉属 *Pseudotsuga*、冷杉属 *Abies* 和落叶松属 *Larix* 等 35 种以上的针叶树（赵建兴等，2008）。

目前，已知红脂大小蠹在我国的分布地区包括山西、陕西、河北、河南、北京等省（市）的大部分区域，以及甘肃、辽宁、内蒙古等省的个别县市（常宝山等，2001；苗振旺等，2001；刘满光等，2004；贾洪敏等，2008）。红脂大小蠹传入我国后转为初期性害虫，主要侵害胸径 10 cm 以上或树龄超过 30 年的健康油松（闫争亮等，2004；潘杰等，2011；Sun*et al.*，2013）。在山西还发现其危害白皮松 *Pinus bungeana*，偶见侵害华山松 *Pinus armandii* Franch、云杉 *Picea meyeri*、樟子松 *Pinus sylvestris* var. *mongolica*（张历燕等，2002；Yan *et al.*，2005；赵建兴，2006），但因危害不严重未引起重视。2017 年，在内蒙古赤峰市喀喇沁旗旺业甸林场 40 年生的樟子松与油松混交林内，我们发现樟子松受红脂大小蠹的严重危害，而油松受害相对较轻，红脂大小蠹优先选择樟子松。

红脂大小蠹在我国属高危险有害生物，分析该虫在新的分布地偏好为害寄主发生变化的原因及潜在的受害寄主，对于其防控具有重要意义。寄主挥发物在红脂大小蠹的行为选择中起重要作

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

用，从树木中释放出来的挥发物可以为小蠹提供长距离和/或短距离的信息素，并且在某些情况下，可以协同小蠹的聚集信息素发挥作用（Erbilgin*et al.*，2000；Miller and Borden，2000；Chen *et al.*，2013）。Schlyter 等提出了小蠹寄主选择依次经历栖境、寄主树种、寄主个体 3 个水平的抉择（Schlyter and Birgersson，1999）。而无论栖境抉择或树种抉择，红脂大小蠹都需要依靠寄主释放的萜烯类挥发物对寄主做出判断（段焰青等，2006；姚剑等，2011）。以往我国相关研究围绕油松展开，在新发生地其偏好寄主发生变化，寄主挥发物对红脂大小蠹的吸引作用是否也发生变化有待研究。本文选择我国 7 种主要的针叶树（包括油松、樟子松、华山松、白皮松、马尾松、红松、落叶松）展开试验。根据上述文献资料及我们前期调查红脂大小蠹在野外的危害情况，本文将 7 个树种划分为三类：（a）主要危害及偏好危害树种：油松、樟子松；（b）受害且未造成大面积死亡的树种：华山松、白皮松；（c）尚未发现受害的树种：马尾松、红松、落叶松。采集 7 种树种木段的挥发性物质进行分析，筛选其中主要萜烯类化合物进行红脂大小蠹的行为选择反应。以期明确寄主树种主要挥发性物质对新侵入地区内红脂大小蠹的吸引作用，为理解植物挥发物对红脂大小蠹寄主选择偏好的影响奠定基础。

1 材料与方法

1.1 供试寄主树种

本试验中 7 个树种的采集地点详见表 1。在不同的采集地点，选取胸径 15 cm、长势较好的健康松树，伐倒后截为 1 m 长的木段，对木段两端进行封蜡保湿，装入防水密封包装袋中运输至内蒙古赤峰市黑里河林场。

1.2 供试虫源

试验所用的红脂大小蠹，均采自内蒙古赤峰市宁城县黑里河林场油松林，采集后通过是否可以听到其摩擦发声辨别雌雄（闫争亮等，2004；Liu*et al.*，2006），分性别放置在养虫盒内，供给新鲜油松树皮韧皮部饲养。养虫盒存放于温度 25℃、相对湿度 55%、光周期为 14 L∶10 D 的光照培养箱内，以备嗅觉行为研究。

表 1 供试树种

Table 1 Tree species for testing

树种 Species	采集地 Location
樟子松 *Pinus sylvestris var. mongolica*	河北承德围场
油松 *Pinus tabuliformis*	内蒙古黑里河林场
马尾松 *Pinus massoniana*	河南信阳
白皮松 *Pinus bungeana*	河北定州
华山松 *Pinus armandii*	辽宁本溪
红松 *Pinus koraiensis*	辽宁本溪
落叶松 *Larix gmelinii*	辽宁本溪

1.3 树干挥发物的收集鉴定

采用动态顶空气体法收集 7 种寄主树种的树干挥发物，在待测松树木段距底端 20～75 cm 处采集。将树皮表面附属物清理干净，用聚乙烯食品级烘烤袋（406 mm × 444 mm，Reynolds，Richmond，VA）包裹树干并做好密封，填充有 Tenax TA（60/80 mesh，Supelco，Bellefonte，DE，USA）的钢制密封管作为吸附管，通过聚四氟乙烯（PVC）软管链接收集袋和吸附管。使用 QC-1S 大气采样仪（北京市劳动保护科学研究所）将袋内空气抽走，泵入活性炭过滤后的净化空气，气体流量为 500 mL/min，密闭循环采气 120 min。每种寄主树种随机采集 3 段重复。

在北京林业大学大型仪器中心，将采集好的吸附管经热脱附吹扫捕集-气相色谱-质谱联用仪（TCT-GC/MS，PE，CP 4020-Trace 2000/voyager；Perkin Elmer；Finnigan，ThermoQuest，San Jose，CA，USA）分析，色谱条件：毛细管柱 Elite-5 ms，载气（He）流速 2 mL/min，柱长 30 m，内径 0.32 mm，膜厚 0.25 μm，采取两级程序升温方法，初始温度 40℃保持 2 min，第 1 级升温速率为 6℃/min 升至 180℃保持 0 min；第 2 级升温速率 15℃/min，至 270℃保持 3 min，共用时 34.33 min；质谱条件：溶剂延迟 1 min，扫描质核比范围 29～500 amu。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 红脂大小蠹对不同挥发物的行为选择

根据 GC-MS 分析结果并参考以往研究结果，选择相对含量较高的 7 种化合物作为刺激样品于室内进行红脂大小蠹的行为选择试验，以正己烷作为溶剂，将 7 种化合物单体分别稀释为 3 个浓度

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

梯度：10^{-4}、10^{-2} 和 1 mg/mL（张龙娃等，2009；张蕾蕾，2010）。试验所用化合物及纯度：（1R）-（+）-α-蒎烯（98%），莰烯（90%），（-）-β-蒎烯（94%），月桂烯（90%），（+）-3-蒈烯（95%），（S）-（-）-柠檬烯（95%），萜品油烯（85%），以上样品均采购自 Sigma 试剂公司（美国）。

根据 Ren 等的方法，使用自制聚四氟乙烯双向十通道行为仪测定红脂大小蠹的行为选择反应（Ren*et al.*，2017）。该行为仪具有 10 个平行的测道，每个测道的两个末端各插入一个 200 μL 的滤芯吸头，一端吸头内装有 60 μL 不同树种挥发物的正己烷溶液，另一端吸头内为 60 μL 正己烷作为对照。经过过滤的湿润空气经由 QC-1S 大气采样仪（北京市劳动保护科学研究所）以 500 mL/min 的流速进入行为选择仪的各个末端。通过尼康 D810 相机（日本）实时拍摄整个行为学测试存储为视频后，使用实时轨迹记录系统 Etho vision XT 14.0（Noldus Information Technology，the Netherlands）识别并分析，统计 30 min 内每头成虫移动的总距离及在各区带停留的时间。行为仪中雌虫和雄虫各放入 5 头，在 7 种物质不同浓度条件下各测试 1 次为一组试验，每组试验完成后调换实验组和对照组的通气位置，共重复 6 组。

1.5　数据分析

通过总离子流峰面积归一化方法定量，计算挥发物的相对含量。使用 Duncan 检验分析挥发性物质含量与红脂大小蠹移动总距离的差异性，采用 t 检验分析红脂大小蠹在行为选择实验中在各区带的停留时间的差异性。所有数据采用 SPSS Statistics 18.0（IBM，美国）进行统计分析，使用 prism 8.0（Graphpad Software，美国）绘制图形。

2　结果与分析

2.1　7 种植物的挥发性物质分析

通过 GC-MS 分析，从 7 种针叶树的挥发物气体样品中共检测出包含烯烃类、醇类、酮类、醛类、酯类、酸类、烷烃和芳香烃 8 类化合物在内的 54 种化合物。其中烯烃类化合物 23 种，在 7 个树种中相对含量均为最大（图 1）。樟子松中共鉴定出 35 种化合物，烯烃类 14 种，相对百分含量为 50.1%；油松中共鉴定出 34 种化合物，烯烃类 13 种，相对百分含量 47.9%；马尾松中共鉴定出 35 种化合物，烯烃类 16 种，相对百分含量 73.8%；白皮松中共鉴定出 29 种化合物，烯烃类 13 种，相对百分含量 84.9%，华山松中共鉴定出 24 种化合物，烯烃类 14 种，相对百分含量 85.3%；红松中共鉴定出 37 种化合物，烯烃类 19 种，相对百分含量为 69.8%；落叶松共采集鉴定到化合物 37 种，烯烃类 16 种，相对百分含量 38.9%。

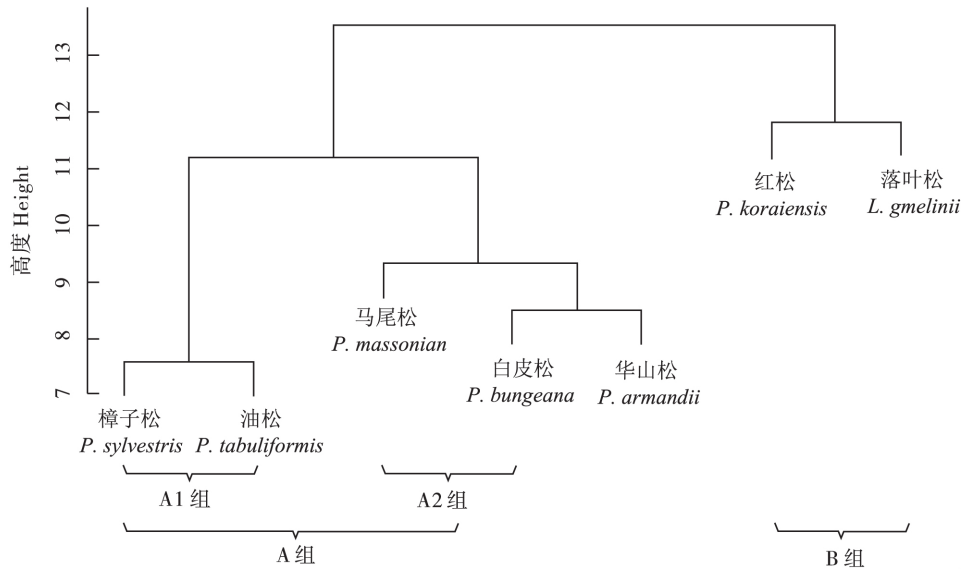


图 1　不同寄主树种 8 类挥发物相对含量

Fig. 1　Relative contents of eight types of volatiles in different tree species

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

利用平方欧式距离—组之间的链接法对 7 种树种的挥发物进行系统聚类分析，在距离 > 12 并且 < 13 处将其分为两个集群（A 和 B）；在距离 > 9 并且 < 11 处，可将 A 集群进一步分为 A1 和 A2 组（图 2）。通过主成分分析将 7 种树种挥发物分为 3 组，与系统聚类分析结果一致，水平轴对总挥发物的解释率为 33.7%，垂直轴的解释率为 20.1%（图 3）。a 类主要受害树种樟子松和油松归为 A1 组，b 类树种华山松、白皮松和 c 类未发现受害树种中的马尾松归为 A2 组，c 类树种中的红松、落叶松归为 B 组。

A 组 5 个树种挥发物的共同特征是含有高比例的 α-蒎烯（22.73% ±6.12%、26.55% ±1.31%、53.62% ±6.69%、16.89% ±2.23%、11.36% ±6.18%），共有的萜烯类化合物包括莰烯、β-蒎烯、柠檬烯、萜品油烯。同时发现，A1 组中 α-蒎烯（22.73% ±6.12%、26.55% ±1.31%）及莰烯（2.49% ±0.5%、3.17% ±0.74%）的比例显著高于 B 组（8.86% ±1.07%、9.41% ±2.56%）和（0、1.32% ±0.52%）（$P < 0.05$）。除此之外，A1 组两树种中共有的萜烯类化合物还包括（+）-3-蒈烯，A2 组包括月桂烯。以上数据见表 2。故选择上述 7 种化合物：（1R）-（+）-α-蒎烯，（-）-β-蒎烯，月桂烯，（+）-3-蒈烯，（S）-（-）-柠檬烯、萜品油烯、莰烯进行红脂大小蠹的行为反应（α-蒎烯、β-蒎烯和柠檬烯的构型参考以往研究结果选择（王鸿斌等，2006；张龙娃等，2009；陈海波，2010；陈大风等，2013）。

2.2 行为选择偏好性分析

2.2.1 红脂大小蠹在不同物质不同浓度刺激下的移动距离

在 30 min 内，红脂大小蠹在不同浓度 7 种化合物刺激下的总移动距离如表 3 所示。随着月桂烯（A2 组特征性挥发物）浓度的升高，红脂大小蠹雌虫的移动距离呈显著下降趋势（$P < 0.05$）；在相同浓度的月桂烯刺激下，红脂大小蠹雌雄成虫的移动距离存在差异，在 10^{-4} mg/mL 的月桂烯刺激下，雌虫移动距离显著高于雄虫（$P < 0.05$），而在 1 mg/mL 的月桂烯刺激下，雌虫移动距离显著低于雄虫（$P < 0.05$）。另外，在 10^{-2} mg/mL 的莰烯刺激下，雌雄成虫的移动距离均显著高于其余对照组（$P < 0.05$），在 10^{-4} mg/mL 的莰烯刺激下，雄虫的移动距离显著低于雌虫（$P < 0.05$）。其他化合物对红脂大小蠹总移动距离的影响不显著。

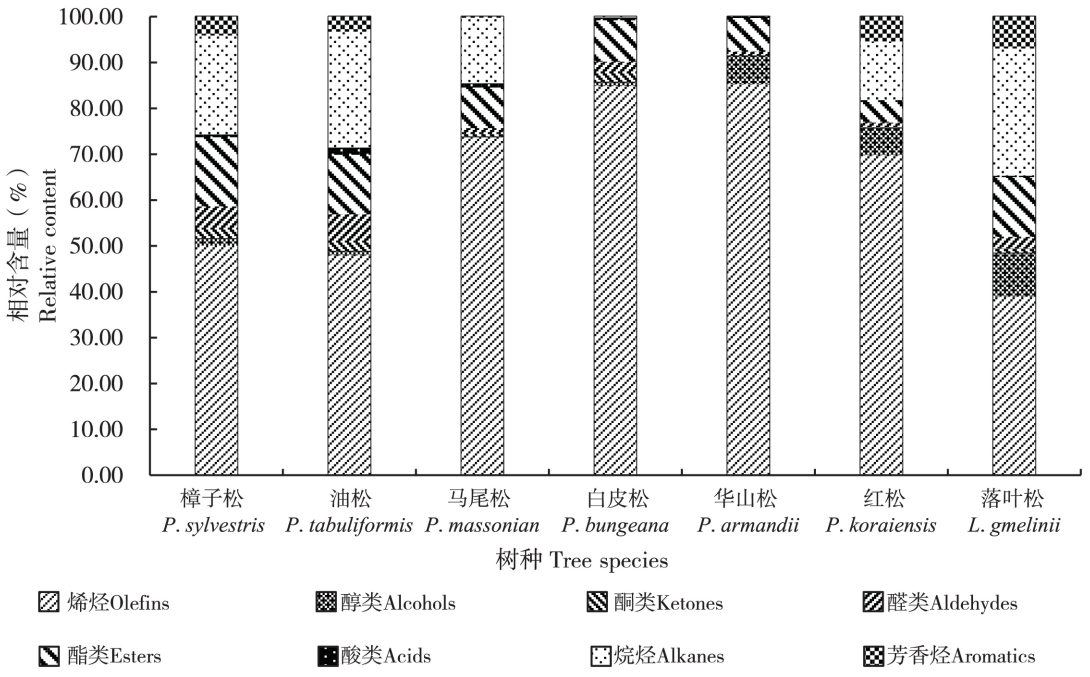


图 2 7 种松树树干挥发物聚类分析图

Fig. 2 Cluster analysis of volatiles from the trunks of 7 tree species

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2　GC-MS 分析鉴定 7 种寄主植物树干挥发性物质的成分及其相对含量

Table 2　Compounds and relative contents of volatiles identified from different plants by GC-MS

序号 Number	化合物名称 Compounds	CAS 号 CAS number	不同树种发物含量（%）Content of volatiles from different plants						
			樟子松 *P. sylvestris*	油松 *P. tabuliformis*	马尾松 *P. massonian*	白皮松 *P. bungeana*	华山松 *P. armandii*	红松 *P. koraiensis*	落叶松 *L. gmelinii*
1	乙酸 Acetic acid	64-19-7	0.59 ± 0.27 d	1.57 ± 0.99 d	0.90 ± 0.26 d	0.59 ± 0.29 d	0.30 ± 0.18 d	–	0.28 ± 0.15 d
2	1,3-丁二醇 1,3-Butanediol	107-88-0	1.05 ± 0.66 d	–	–	–	0.13 ± 0.1 d	–	–
3	4-乙酰氧基-2-氮杂环丁酮 4-Acetoxy-2-azetidinone	28562-53-0	–	–	–	0.62 ± 0.54 d	–	–	–
4	正丁醇 1-Butanol	71-36-3	–	–	–	0.82 ± 0.25 bcd	6.10 ± 1.62 d	2.41 ± 0.84 cd	8.20 ± 1.74 bc
5	2,3-环氧-4-甲基戊烷 2,3-Epoxy-4-methylpentane	1192-31-0	3.68 ± 1.20 bcd	1.99 ± 0.37 d	0.49 ± 0.16 d	–	–	–	–
6	环庚三烯 Cycloheptatriene	544-25-2	0.57 ± 0.08 d	3.43 ± 0.08 d	0.74 ± 0.15 d	–	–	0.32 ± 0.07 d	–
7	己醛 Hexanal	66-25-1	3.34 ± 0.37 cd	2.81 ± 0.36 cd	0.51 ± 0.12 d	1.53 ± 0.17 d	0.44 ± 0.07 d	1.00 ± 0.19 d	1.87 ± 0.34 cd
8	乙酸丁酯 Butyl acetate	123-86-4	3.41 ± 0.50 cd	0.96 ± 0.60 d	0.54 ± 0.23 d	1.15 ± 0.24 d	0.89 ± 0.37 d	0.65 ± 0.29 d	2.44 ± 0.41 cd
9	2-甲基-3-己酮 2-Methyl-3-hexanone	7379-12-6	1.13 ± 0.38 d	0.86 ± 0.11 d	0.43 ± 0.05 d	0.28 ± 0.08 d	–	–	–
10	DL-泛酰内酯 Pantolactone(DL-)	52126-90-6	0.63 ± 0.46 d	1.04 ± 0.10 d	0.33 ± 0.05 d	0.08 ± 0.12 d	–	–	–
11	丙烯酸正丁酯 Butyl acrylate	141-32-2	8.90 ± 1.91 ab	7.48 ± 1.43 d	3.88 ± 0.66 cd	3.91 ± 1.25 bcd	5.85 ± 0.81 cd	2.66 ± 0.88 cd	7.88 ± 1.47 bc
12	正壬烷 N-nonane	111-84-2	0.26 ± 0.14 d	0.19 ± 1.43 bcd	–	–	–	0.73 ± 0.24 d	0.07 ± 0.03 d
13	丙酸丁酯 Butyl propionate	590-01-2	1.05 ± 0.81 d	2.27 ± 0.56 cd	1.69 ± 0.30 d	1.68 ± 0.53 d	–	1.28 ± 0.48 d	2.34 ± 0.67 cd
14	α-蒎烯 a　alpha-Pinene a	7785-70-8	0.39 ± 0.11 d	0.53 ± 0.09 d	2.51 ± 1.06 cd	0.47 ± 0.06 d	0.26 ± 0.17 d	0.70 ± 0.19 d	–
15	α -蒎烯 b　alpha-Pinene b	80-56-8	22.73 ± 6.12 a	26.55 ± 1.31 a	53.62 ± 6.69 a	16.89 ± 2.23 ab	11.36 ± 6.18 ab	8.86 ± 1.07 bc	9.41 ± 2.56 bc
16	莰烯 Camphene	79-92-5	2.49 ± 0.51 cd	3.17 ± 0.74 cd	0.84 ± 0.10 d	0.43 ± 0.05 d	0.15 ± 0.12 d	–	1.32 ± 0.52 d
17	异丁酸丁酯 Butyl isobutyrate	97-87-0	0.44 ± 0.22 d	0.57 ± 0.14 d	0.73 ± 0.14 d	0.43 ± 0.12 d	–	–	–
18	β-蒎烯 a　β-Pinene a	18172-67-3	–	–	1.99 ± 0.29 cd	2.49 ± 0.76 d	0.14 ± 0.11 d	0.29 ± 0.23 d	–

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

续表 2 Continued table 2

序号 Number	化合物名称 Compounds	CAS 号 CAS number	不同树种发物含量（%）Content of volatiles from different plants						
			樟子松 *P. sylvestris*	油松 *P. tabuliformis*	马尾松 *P. massonian*	白皮松 *P. bungeana*	华山松 *P. armandii*	红松 *P. koraiensis*	落叶松 *L. gmelinii*
19	桧烯 Sabinene	3387-41-5	–	–	0.07 ± 2.73 cd	–	0.16 ± 0.07 d	0.22 ± 0.18 d	1.62 ± 0.74 cd
20	β-蒎烯 b β-Pinene b	127-91-3	3.23 ± 1.24 cd	1.57 ± 0.29 d	0.08 ± 0.06 d	28.49 ± 0.41 a	2.76 ± 0.91 cd	5.88 ± 1.35 bcd	6.46 ± 1.37 bcd
21	4-（4-甲基-3-戊烯基）-1,2-二硫-4-环已烯 4-（4-Methyl-3-pentenyl）-1,2-dithia-4-cyclohexene	73188-23-5	–	–	–	–	2.38 ± 1.95 cd	–	–
22	2,2,11,11-四甲基-十二烷 Dodecane, 2,2,11,11-tetramethyl-	127204-12-0	12.72 ± 2.91 ab	18.64 ± 2.48 ab	3.94 ± 2.73 cd	–	–	–	19.69 ± 0.29 d
23	月桂烯 Myrcene	123-35-3	–	–	6.19 ± 2.27 bcd	10.31 ± 1.47 a	44.92 ± 14.79 bc	7.08 ± 2.77 bcd	–
24	2,2,4-三甲基-1-（2-甲基丙烷-1-基）哌嗪 2,2,4-trimethylhexane	16747-25-4	–	–	–	–	–	8.53 ± 6.66 bc	–
25	丁酸丁酯 Butyl butyrate	109-21-7	1.27 ± 0.61 cd	1.69 ± 0.39 d	2.02 ± 0.35 cd	1.88 ± 0.40 d	0.54 ± 0.10 cd	0.31 ± 0.12 d	0.39 ± 0.22 d
26	α-水芹烯 Alpha-phellandrene	99-83-2	0.18 ± 0.09 d	–	0.06 ± 0.04 d	–	–	0.25 ± 0.10 d	0.59 ± 0.33 d
27	(+)-3 蒈烯 3-Carene	13466-78-9	0.26 ± 0.20 d	1.66 ± 0.97 d	–	–	0.23 ± 0.11 d	12.33 ± 7.01 ab	0.84 ± 0.23 d
28	松油烯 Lpha-terpinene	99-86-5	–	–	–	–	–	0.13 ± 0.10 d	1.19 ± 0.70 d
29	2-蒈烯 2-carene	554-61-0	0.15 ± 0.16 d	–	–	–	–	3.03 ± 0.12 d	0.31 ± 0.27 d
30	间异丙基甲苯 M-cymene	535-77-3	4.1 ± 1.86 cd	–	0.21 ± 0.09 d	–	–	5.05 ± 1.13 cd	2.13 ± 1.13 cd
31	4-异丙基甲苯 p-Cymene	99-87-6	–	3.26 ± 0.72 cd	–	–	–	–	3.41 ± 1.96 cd
32	2,2,4,4,5,5,7,7-八甲基辛烷 2,2,4,4,5,5,7,7-octamethyloctane	5171-85-7	0.19 ± 0.40 d	3.23 ± 0.49 cd	0.53 ± 0.37 d	–	–	–	1.95 ± 1.01 cd
33	(-)-柠檬烯(-)-limone	5989-27-5	–	–	–	1.59 ± 0.33 cd	–	–	–
34	2,2,4-三甲基戊烷 2,2,4-Trimethylpentane	540-84-1	–	–	–	–	–	2.21 ± 1.15 d	–
35	(+)-柠檬烯(+)-Dipentene	5989-54-8	17.32 ± 8.70 ab	7.28 ± 0.83 bc	5.23 ± 1.19 cd	19.04 ± 0.41 a	22.3 ± 0.68 a	17.79 ± 8.36 a	6.59 ± 2.09 bcd

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

续表 2 Continued table 2

序号 Number	化合物名称 Compounds	CAS 号 CAS number	不同树种发物含量（%）Content of volatiles from different plants						
			樟子松 *P. sylvestris*	油松 *P. tabuliformis*	马尾松 *P. massonian*	白皮松 *P. bungeana*	华山松 *P. armandii*	红松 *P. koraiensis*	落叶松 *L. gmelinii*
36	4-甲基-1-（1-甲基乙基）-双环[3.1.0]己-2-烯 Bicyclo[3.1.0]hex-2-ene, 4-methyl-1-(1-methylethyl)-	28634-89-1	–	–	0.94 ± 0.50 d	–	–	–	0.57 ± 0.10 d
37	3-异丙基-6-亚甲基-1-环己烯 p-mentha-1(7),2-diene	555-10-2	1.32 ± 0 d	–	0.57 ± 0.39 d	4.14 ± 0.18 bc	–	0.72 ± 0.33 d	1.26 ± 0.6 cd
38	萜品烯 a　Gamma-terpinene a	99-85-4	0.33 ± 0.15 d	0.46 ± 0.03 d	–	0.15 ± 0.07 d	–	1.22 ± 0.23 d	3.80 ± 1.63 cd
39	萜品烯 b　Gamma-terpinene b	900105-17-9	0.47 ± 0.25 d	1.29 ± 0.12 d	0.10 ± 0.07 d	0.12 ± 0.11 d	0.21 ± 0.09 d	1.37 ± 0.76 d	0.36 ± 0.18 d
40	萜品油烯 Terpinolene	586-62-9	0.45 ± 0.23 d	0.86 ± 0.20 d	0.05 ± 0.04 d	0.26 ± 0.12 d	0.14 ± 0.07 d	3.09 ± 0.84 cd	2.89 ± 1.61 cd
41	十一烷 n-Hendecane	1120-21-4	–	–	–	–	–	1.15 ± 0.46 cd	–
42	四氢-2,5-二甲基-2H-吡喃甲醇 (2,5-dimethyloxan-2-yl) methanol	54004-46-5	0.40 ± 0.31 d	0.27 ± 0.17 d	0.10 ± 0.07 d	–	–	2.42 ± 1.10 cd	0.70 ± 0.42 d
43	壬醛 1-Nonanal	124-19-6	1.27 ± 0.48 cd	2.95 ± 0.64 cd	0.46 ± 0.04 d	1.03 ± 0.27 d	0.29 ± 0.12 d	–	0.67 ± 0.42 d
44	异佛尔酮 Isophorone	78-59-1	0.56 ± 0.18 d	0.30 ± 0.19 d	0.08 ± 0.06 d	0.16 ± 0.07 d	0.12 ± 0.10 d	0.08 ± 0.06 d	0.67 ± 0.42 d
45	4-乙基-1-辛炔-3-醇 4-ethyl-1-octyn-3-ol	5877-42-9	0.17 ± 0.01 d	0.74 ± 0.33 d	–	0.15 ± 0.12 d	–	–	–
46	3-去甲酮 3-Nopinenone	30460-92-5	–	–	–	0.62 ± 0.08 d	–	–	–
47	alpha-松油醇 alpha-Terpineol	98-55-5	–	–	–	–	–	0.38 ± 0.10 d	0.64 ± 0.36 d
48	α-长叶蒎烯 a-Longipinene	5989-8-2	–	–	–	–	–	1.69 ± 0.86 d	–
49	十六烷 Hexadecane	544-76-3	0.29 ± 0.04 bcd	0.20 ± 0.08 d	0.71 ± 0.25 d	–	–	0.05 ± 0.04 d	0.76 ± 0.42 d
50	长叶烯 Longifolene	475-20-7	0.21 ± 0.02 d	0.79 ± 0.26 d	0.65 ± 0.13 d	–	0.19 ± 0.02 d	4.10 ± 1.25 cd	1.56 ± 0.68 cd
51	(-)-异丁香烯(-)-isocaryophyllene	118-65-0	–	0.09 ± 0.06 d	0.16 ± 0.06 d	0.51 ± 0.36 d	0.08 ± 0.07 d	0.70 ± 0.17 d	0.14 ± 0.02 d
52	正十四碳烷 Tetradecane	629-59-4	4.45 ± 0.11 d	0.92 ± 0.07 d	7.49 ± 0.07 d	0.18 ± 0.06 d	–	0.13 ± 0.06 d	4.57 ± 1.73 cd
53	2,6-二叔丁基对甲基苯 Butylated hydroxytoluene	128-37-0	–	–	–	–	–	0.36 ± 0.28 d	1.41 ± 0.32 d
54	正十九烷 N-nonadecane	629-92-5	–	0.13 ± 0.05 d	1.17 ± 0.42 d	–	–	–	0.70 ± 0.05 d

注：“–”表示未检测到该物质，检索结果出现的两种 α-蒎烯、β-蒎烯、萜品烯未确定到具体构型。Note: The dash (–) indicates that the compound had not been detected in the volatiles, two α-pinene, β-pinene and terpinene appear in the search results have not been determined to the specific configuration.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

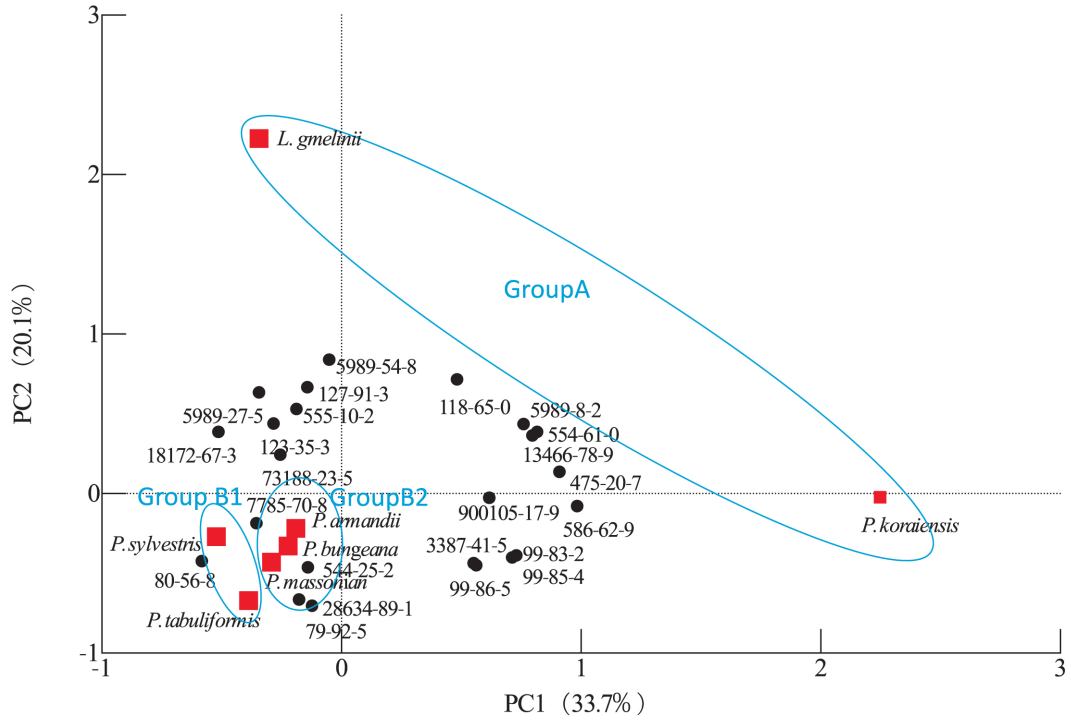


图 3 7 种松树树干挥发物主成分分析得分图

Fig. 3 PCA score plot of volatiles from the trunks of 7 tree specie

表 3 红脂大小蠹在不同物质不同浓度刺激下 30 min 内的移动距离(cm)

Table 3 Total distance (cm) moved in 30 mins by *Dendroctonus valens* exposed to different concentrations (10^{-4}, 10^{-2}, 1 mg/mL) of volatile compounds

化合物 Compounds	雌虫 Female			雄虫 Male		
	10^{-4} mg/mL	10^{-2} mg/mL	1 mg/mL	10^{-4} mg/mL	10^{-2} mg/mL	1 mg/mL
(1R)-(+)-α-蒎烯 (1R)-(+)-α-pinene	77.68±6.50 bc	74.19±4.41 bc	46.56±7.26 c	53.92±7.17 bc	51.40±5.41 bc	61.49±11.23 bc
(+)-3-蒈烯 (+)-3-carene	66.75±7.85 bc	74.57±10.65 bc	40.81±6.49 c	87.91±10.49 bc	73.72±9.21 bc	45.49±5.50 c
月桂烯 myrcene	235.11±37.54 a	47.57±3.63 bc	27.39±7.42 d	73.51±12.16 bc	50.43±8.37 c	67.03±13.68 bc
萜品油烯 terpineol	67.52±8.02 bc	62.66±14.24 bc	47.73±8.17 c	83.74±12.28 bc	105.58±14.91 ab	84.09±14.97 bc
(S)-(-)-柠檬烯 (S)-(-)-limonene	83.91±11.30 bc	64.81±8.44 bc	69.33±8.72 bc	73.93±11.03 bc	91.61±11.04 b	70.15±13.10 bc
莰烯 camphene	54.61±4.21 bc	103.71±12.17 ab	33.99±3.83 cd	26.90±7.30 d	125.59±16.43 ab	65.26±6.65 bc
(-)-β-蒎烯 (-)-β-pinene	60.06±9.95 bc	58.47±6.70 bc	63.87±7.15 bc	65.79±10.77 bc	54.20±8.94 bc	74.97±8.74 bc

注：表中数据是平均数±标准误，数据后标有不用字母表示差异显著($P<0.05$，Duncan's 多重比较)。 Note: Data in the table were expressed as mean±standard deviation, and those followed by different letters differ significantly ($P<0.05$, Duncan's multiple comparisons).

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.2.2　红脂大小蠹在不同区带内停留的平均时间

在不同浓度各化合物的刺激下，试验记录开始后 30 min 内，红脂大小蠹在不同区带的停留时间如图 4 所示。雌虫在 10^{-2} mg/mL 的(+)-3-蒈烯($t = 5.264$，$P < 0.001$)，1 mg/mL 的月桂烯($t = 3.796$，$P < 0.005$)，1 mg/mL (-)-β-蒎烯($t = 3.347$，$P < 0.005$)区带的停留时间显著高于对照正己烷组，雄虫在 10^{-4} mg/mL 的(S)-(-)-柠檬烯区带内停留时间显著高于对照组($t = 3.853$，$P < 0.005$)。其中(-)-β-蒎烯与(S)-(-)-柠檬烯为 A 组树种共有的化合物，(+)-3-蒈烯为 A1 组树种的特征性挥发物，月桂烯为 A2 组树种的特征性挥发物。其他对照条件下没有显著差异。

3　结论与讨论

本实验中 7 种松树挥发物中，α-蒎烯，β-蒎烯，月桂烯，(+)-3-蒈烯，(-)-柠檬烯为主要挥发性成分，与北美红脂大小蠹的主要寄主黄松的松脂主要成分相符(Hobson *et al.*，1993)。松树的挥发性物质聚类分析与主成分分析结果与目前野外受害情况基本一致，已发现受害的树种与未发现受害的树种挥发物分为两组。除马尾松外，A 组树种为目前已发现受害的 a 类和 b 类树种，B 组为野外未发现受害树种。且 A 组 5 个树种挥发物的共同特征是含有高比例的 α-蒎烯(22.73% ± 6.12%、26.55% ± 1.31%、53.62% ± 6.69%、16.89% ± 2.23%、11.36% ± 6.18%)，共有的萜烯类化合物包括莰烯、β-蒎烯、柠檬烯、萜品油烯。通过对比 A1 组与 A2 组，发现 A1 组中特有的萜烯类挥发物为(+)-3-蒈烯，A2 组特有的萜烯类挥发物为月桂烯，且 A1 组莰烯(2.49% ± 0.5%、3.17% ± 0.74%)的比例高于 A2 (0.84% ± 0.1%、0.43% ± 0.05%、0.15% ± 0.12%)组。从以上结果推测，树种挥发性物质的组成、含量等影响红脂大小蠹的偏好寄主选择。

Hobson 等在美国的研究认为 β-蒎烯对红脂大小蠹的引诱能力最强(Hobson*et al.*，1993)，Sun 等在中国的研究发现，3-蒈烯对红脂大小蠹引诱能力最强，柠檬烯具有抑制引诱的作用(Sun *et al.*，2004)。本文中 β-蒎烯、柠檬烯为 A 组树种共有的挥发物，(+)-3-蒈烯为 A1 组树种特有挥发性物质。与以往研究不同，本研究中 1 mg/mL (-)-β-蒎烯与 10^{-2} mg/mL (+)-3-蒈烯对雌性红脂大小蠹均有明显的吸引作用，(S)-(-)-柠檬烯对红脂大小蠹雄虫也有吸引作用。停留时间在本试验中被选择作为评价其行为选择的主要指标。统计结果表明，雌虫在 10^{-2} mg/mL 的(+)-3-蒈烯($t = 5.264$，$P < 0.001$)以及 1 mg/mL (-)-β-蒎烯($t = 3.347$，$P < 0.005$)区带的停留时间均显著高于对照正己烷组，表明上述两种刺激对红脂大小蠹雌虫具有显著的吸引作用。雄虫在 10^{-4} mg/mL 的(S)-(-)-柠檬烯($t = 3.853$，$P < 0.005$)区带内停留时间显著高于对照组，且王鸿斌等证明雄性红脂大小蠹对柠檬烯的触角电位反应值与对照之间的差异达到了显著性的水平(王洪斌等，2006)，这一结果说明该浓度下(S)-(-)-柠檬烯对红脂大小蠹雄虫具有吸引作用。由于红脂大小蠹在北美原产地就存在对萜烯类化合物反应的地理差异(Sun *et al.*，2004；张龙娃，2007)，推测上述结果差异可能与红脂大小蠹对寄主挥发性萜烯类物质的反应出现新的地理变异有关；或由于本研究在室内进行，而以往研究为野外试验，结果差异与不同温度条件下挥发物的释放速率有关。

本研究中发现莰烯与月桂烯对红脂大小蠹的行为具有刺激作用。移动距离的结果显示，雌虫在 10^{-4} mg/mL 月桂烯刺激下以及雌雄成虫在 10^{-2} mg/mL 莰烯刺激下活动较为活跃。停留时间的统计结果显示，雌虫在 1 mg/mL 的月桂烯($t = 3.796$，$P < 0.005$)区带的停留时间显著高于对照正己烷组。莰烯为 A 组树种共有的萜烯类挥发物，且 A1 组莰烯(2.49% ± 0.5%、3.17% ± 0.74%)的比例高于 A2 组(0.84% ± 0.1%、0.43% ± 0.05%、0.15% ± 0.12%)；月桂烯为 A2 组特有的萜烯类挥发物。

值得注意的是，马尾松与已发现受害的 4 个寄主树种挥发物较为相似，且与 a 类树种樟子松、油松同属二针松，但在自然条件下未见其被危害的报道；需要进一步了解红脂大小蠹的寄主选择机制，除了寄主植物挥发性物质的影响以外，需综合考虑当地气候、温湿度，树皮厚度、营养物质、含水量、渗透压以及流脂等情况，展开进一步的研究。

本文研究了我国几种主要松树树干挥发物的组成及含量。通过主成分分析和聚类分析明确了 7 种树种挥发物的差异性，并与红脂大小蠹的野外危害情况类比分析，筛选出可能与红脂大小蠹寄主选择行为相关的萜烯类挥发物进行行为选择试

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

验。研究发现红脂大小蠹的主要寄主树种油松和新发现的优势危害树种樟子松的挥发性物质高度相似，且其中的主要挥发性萜烯化合物 β-蒎烯、柠檬烯、(+)-3-蒈烯对红脂大小蠹具有吸引作用，莰烯与月桂烯对红脂大小蠹也有明显的刺激作用。本研究加强了红脂大小蠹趋性行为与寄主树种挥发性代谢物质相互关系的研究，有助于红脂大小蠹引诱剂和驱避剂的开发，同时进一步阐明其寄主选择机制，为红脂大小蠹监测与控制技术体系提供重要依据。

致谢：感谢内蒙古赤峰市黑里河林场对本研究的大力支持，为我们提供了试虫和部分试验场所。

参考文献 (References)

Chang BS, Liu SC, Zhao XM, *et al*. Study on the occurrence of *Dendroctonus valens* [J]. *Shanxi Forestry Science and Technology*, 2001, 4: 1 – 4. [常宝山，刘随存，赵小梅，等. 红脂大小蠹发生规律研究 [J]. 山西林业科技，2001，4：1 – 4]

Chen DF, Li YJ, Kong XB. Olfactory reception of conspecific aggregation pheromone and host volatile terpenes by Asian larch bark beetle, *Ips subelongatus* [J]. *Scienta Silvae Sincae*, 2013, 49 (11): 89 – 97. [陈大风，李叶静，孔祥波. 落叶松八齿小蠹对聚集信息素和寄主挥发性萜烯成分的电生理响应 [J]. 林业科学，2013，49 (11)：89 – 97]

Chen HB. Study on the Semiochemicals of *Dendroctonus valens* LeConte [D]. BeiJing: Chinese Academy of Forestry Master Thesis, 2010. [陈海波. 红脂大小蠹化学信息物质的研究 [D]. 北京：中国林业科学研究院硕士论文，2010]

Duan YQ, Ye H, Li QQ, *et al*. Selection and harm mechanism of coniferous host trees by bark beetles [J]. *Chinese Bulletin of Entomology*, 2006, 43 (1): 16 – 21. [段焰青，叶辉，李青青. 小蠹虫对针叶类寄主树木的选择危害机制 [J]. 昆虫知识，2006，43 (1)：16 – 21]

Erbilgin N, Raffa KF. Opposing effects of host monoterpenes on responses by two sympatric species of bark beetles to their aggregation pheromones [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2000, 26 (11): 2527 – 2548.

Erbilgin N, Mori SR, Sun JH, *et al*. Response to host volatiles by native and introduced populations of *Dendroctonus valens* (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) in north America and China [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2007, 33 (1): 131 – 146.

Gao BJ, Xin JN, Guan HY, *et al*. The generation and damage regulation of red turpentine beetle [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2003, 5: 71 – 73. [高宝嘉，信金娜，关慧元，等. 红脂大小蠹的发生和危害规律 [J]. 动物学杂志，2003，5：71 – 73]

Hobson KR, Wood DL, Cool LG, *et al*. Chiral specificity in responses by the bark beetle *Dendroctonus valens* to host kairomones [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1993, 19 (9): 1837 – 1846.

Jia HM, Huang DZ, Cao YX, *et al*. Relationship between monoterpenoids and resistance of Chinese pine to red turpentine beetle [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2008, 36 (1): 48 – 50. [贾洪敏，黄大庄，曹逸霞等. 松脂单萜类物质与油松对红脂大小蠹抗性的关系 [J]. 东北林业大学学报，2008，36 (1)：48 – 50]

Liu MG, Wen XJ, Zhao YF, *et al*. Effect of temperature and humidity on the size of *Dendroctonus valens* and its phenotypic observation [J]. *Hebei Forestry Science and Technology*, 2004, 1: 14 – 15. [刘满光，温秀军，赵玉芬，等. 温湿度对红脂大小蠹扬飞的影响及物候期的观测 [J]. 河北林业科技，2004，1：14 – 15]

Liu ZD, Zhang LW, Sun JH. Attacking behavior and behavioral responses to dust volatiles from holes bored by the red turpentine beetle, *Dendroctonus valens* (Coleoptera: Scolytidae) [J]. *Environmental Entomology*, 2006, 35 (4): 1030 – 1036.

Miao ZW, Fan JX. Occurrence and prevention of *Dendroctonus valens* in the United States [J]. *Shanxi Forestry*, 2000, 6: 20 – 22. [苗振旺，范俊秀. 强大小蠹在美国的发生与防治 [J]. 山西林业，2000，6：20 – 22]

Miao ZW, Zhou WM, Huo LY, *et al*. Study on biological characteristics of *Dendroctonus valens* [J]. *Shanxi Forestry Science and Technology*, 2001, 1: 34 – 37, 40. [苗振旺，周维民，霍履远，等. 强大小蠹生物学特性研究 [J]. 山西林业科技，2001，1：34 – 37，40]

Miller DR, Borden JH. Dose – dependent and species – specific responses of pine bark beetles (Coleoptera: Scolytidae) to monoterpenes in association with pheromones [J]. *The Canadian Entomologist*, 2000, 132 (2): 183 – 195.

Pan J, Wang T, Wen JB, *et al*. Changes in invasion characteristics of *Dendroctonus valens* after introduction into China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31 (7): 1970 – 1975. [潘杰，王涛，温俊宝，等. 红脂大小蠹传入中国危害特性的变化 [J]. 生态学报，2011，31 (7)：1970 – 1975]

Pureswaran DS, Gries R, Borden JH. Antennal responses of four species of tree killing bark beetles to volatiles collected from beetles, and their host and nonhost conifers [J]. *Chemoecology*, 2004, 14 (2): 59 – 66.

Schlyter F, Birgersson G. Pheromones of Non – Lepidopteran Insects Associated with Agricultural Plants [C]. Wallingford: CAB International, 1999: 113 – 148.

Sun JH, Lu M. Red turpentine beetle: Innocuous native becomes invasive tree killer in China [J]. *Annual Review of Entomology*, 2013, 58: 293 – 311.

Sun JH, Miao ZW, Zhang Z, *et al*. Red turpentine beetle, *Dendroctonus valens*, response to host semiochemicals in China [J]. *Environmental Entomology*, 2004, 33 (2): 206 – 212.

Wang HB, Wang YG, Zhang Z, *et al*. The volatile components of the Chinese pine and the EAG responses of the *Dendroctonus valens* (Coleoptera: Scolytidae) [J]. *Sctentia Silvae Sinicae*, 2006, 42 (5): 84 – 88. [王鸿斌，王玉刚，张真，等. 油松挥发性物质分析及红脂大小蠹的触角电位反应 [J]. 林业科学，2006，

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

42 (5)：84 – 88]

Wood DL. The role of pheromones，kairomones，and allomones in the host selection and colonization behavior of bark beetles [J]. *Annual Review of Entomology*，1982，27：411 – 446.

Yan Z，Sun J H，Don O. The red turpentine beetle，*Dendroctonus valens* LeConte (Scolytidae)：An exotic invasive pest of pine in China [J]. *Biodiversity & Conservation*，2005，14 (7)：1735 – 1760.

Yao J，Zhang LW，Wen JS，*et al*. A study on the behavioral trend of *Dendroctonus valens* LeConte on the bark of four coniferous trees [J]. *Phytosanitary*，2011，25 (2)：1 – 5. [姚剑，张龙娃，温劲松，等. 红脂大小蠹对 4 种针叶树树皮的行为趋向研究 [J]. 植物检疫，2011，25 (2)：1 – 5]

Yan ZL，Fang YL，Sun JH，*et al*. Identification and electroantennal olfactory and behavioral tests of hindgut – produced volatiles of the red turpentine beetle，*Dendroctonus valens* LeConte (Coleoptera：Scolytidae) [J]. *Acta Entomologica Sinica*，2004，47 (6)：695 – 700. [闫争亮，方宇凌，孙江华，等. 红脂大小蠹后肠挥发性物质的鉴定、触角电位和室内趋向实验 [J]. 昆虫学报，2004，47 (6)：695 – 700]

Zhang LW，Liu ZD，Yao J. Changes in terpene composition of *Pinus tabuliformis* and reaction characteristics of *Dendroctonus valens* LeConte [J]. *Chinese Bulletin of Entomology*，2009，46 (2)：249 – 255. [张龙娃，刘柱东，姚剑. 油松萜烯成分变化与红脂大小蠹的反应特性 [J]. 昆虫知识，2009，46 (2)：249 – 255]

Zhang LW，Lu M，Liu ZD，*et al*. Progress on invasion biology and chemical ecology of red turpentine beetle *Dendroctonus valens* [J]. *Chinese Bulletin of Entomology*，2007，44 (2)：171 – 178. [张龙娃，鲁敏，刘柱东，等. 红脂大小蠹入侵机制与化学生态学研究 [J]. 昆虫知识，2007，44 (2)：171 – 178]

Zhang LY，Chen QC，Zhang XB. Studies on the characters and bionomics of *Dendroctonus valens* LeConte [J]. *Scienta Silvae Sincae*，2002，38 (4)：95 – 99 [张历燕，陈庆昌，张小波. 红脂大小蠹形态学特征及生物学特性研究 [J]. 林业科学，2002，38 (4)：95 – 99]

Zhao JX. Study on Biological Control of *Dendroctonus valens* [D]. Beijing：Chinese Academy of Forestry Master Thesis，2006. [赵建兴. 红脂大小蠹生物防治研究 [D]. 北京：中国林业科学研究院硕士论文，2006]

Zhao JX，Yang ZQ，Ren XH. Biological characteristics and occurring law of *Dendroctonus valens* in China [J]. *Scienta Silvae Sincae*，2008，44 (2)：99 – 105. [赵建兴，杨忠岐，任晓红. 红脂大小蠹的生物学特性及在我国的发生规律 [J]. 林业科学，2008，44 (2)：99 – 105]

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net