几种抗氧化剂对单萜烯稳定性及其对松墨天牛诱捕效果的影响*

吴 华** 戴建青*** 陈大嵩 黄 鸿***

（广东省科学院动物研究所，广东省动物保护与资源利用重点实验室，广东省野生动物保护与利用公共实验室，广东省矿物油农药工程技术研究中心，广州 510260）

摘 要 【目的】评价 6 种抗氧化剂对单萜烯类化合物稳定性的影响及其在野外条件下单萜烯对松墨天牛 *Monochamus alternatus* Hope 成虫的诱杀效果。【方法】采用水浴锅加热加速氧化法，以气相色谱法测定含量，研究不同抗氧化剂对 α-蒎烯、β-蒎烯和月桂烯稳定性的影响，并进行林间松墨天牛的诱捕试验。【结果】在供试的 6 种抗氧化剂中，TBHQ 对单萜烯的保护效果最显著（$P<0.05$）。浓度对单萜烯的保护效果影响显著（$F=6.631$，$P=0.007$），其中浓度为 0.03%的保护效果最显著（$P<0.05$）。抗氧化剂对 α-蒎烯、β-蒎烯和月桂烯的保护效果存在显著差别（$F=3.231$，$P=0.031$），抗氧化剂对 β-蒎烯的保护效果最显著（$P<0.05$）。野外诱捕实验表明添加抗氧化剂 0.03%TBHQ 的单萜烯（α-蒎烯：β-蒎烯：月桂烯=50：40：10）对松墨天牛野外诱捕持效期明显延长，持效期延长不少于 30 d。【结论】添加抗氧化剂可保护单萜烯，维持单萜烯在野外条件下的稳定性，保持引诱剂成分的稳定性与持效性，延长单萜烯类昆虫引诱剂在野外诱捕害虫的持效期。

关键词 抗氧化剂；单萜烯；α-蒎烯；β-蒎烯；月桂烯；松墨天牛；稳定性

Effects of different antioxidants on the stability of monoterpene lures used to trap *Monochamus alternatus*

WU Hua** DAI Jian-Qing*** CHEN Da-Song HUANG Hong***

(Guangdong Key Laboratory of Animal Conservation and Resource Utilization, Guangdong Public Laboratory of Wild Animal Conservation and Utilization, Guangdong Engineering Research Center for Mineral Oil Pesticides, Institute of Zoology, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510260, China)

Abstract **[Objectives]** To investigate the effects of six antioxidants on the stability of monoterpene lures used to trap adult *Monochamus alternatus* Hope in the field. **[Methods]** The effects of different antioxidants on the stability of α-pinene, β-pinene, and myrcene were determined by gas chromatography using the water bath heating and accelerated oxidation methods. A trapping assay of *M. alternatus* was carried out in forest. **[Results]** Of the 6 antioxidants tested, TBHQ had the most significant protective effect on monoterpenes ($P<0.05$). The concentration of TBHQ significantly affected monoterpene stability ($F=6.631$, $P=0.007$); the optimal concentration was 0.03% ($P<0.05$). There were significant differences in the stability of the three monoterpenes α-pinene, β-pinene, and myrcene even with the same antioxidant ($F=3.231$, $P=0.031$); α-pinene was the most stable ($P<0.05$). Field trapping results indicate that an olfactory lure comprised of 0.03% TBHQ and a ratio of α-pinene:β-pinene:myrtene of 50：40：10 extended the effectiveness of lures in forest by at least 30 days. **[Conclusion]** Addition of antioxidant to protect monoterpenes significantly extends the life of monoterpene olfactory attractants used to trap *M. alternatus* in forest.

Key words antioxidant; monoterpene; α-pinene; β-pinene; myrcene; *Monochamus Alternatus*; stability

---

*资助项目 Supported projects：广东省科学院科技发展专项（2018GDASCX-0107；2019GDASYL-0302007）

**第一作者 First author，E-mail：592759531@qq.com

***共同通讯作者 Co-corresponding authors，E-mail：jqdai@ giz.gd.cn；gdipml@ giz.gd.cn

收稿日期 Received：2020-08-27；接受日期 Accepted：2020-12-09

松墨天牛 *Monochamus alternatus* Hope 又名松褐天牛，是一种危害松属树种 *Pinus* spp. 如马尾松 *Pinus massoniana* Lamb、湿地松 *Pinus elliottii* Engelm 等林木的蛀干害虫，其成虫也是松材线虫 *Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner & Buhrer) Nickle 的主要传播媒介（胡长效等，2003）。而松材线虫是毁灭性的森林病害——松材线虫病的病原物，主要危害松属树种。在松材线虫的扩散和侵染的过程中，松墨天牛起着携带、传播和协助病原侵入寄主的关键性作用（杨宝君等，2003；成新跃等，2005）。故控制松墨天牛是防治松材线虫病的关键工作。目前，松墨天牛引诱剂已经得到广泛应用，其主要成分为植物源单萜烯类信息素，以 α-蒎烯、β-蒎烯为主（Fan *et al.*，2007a，2007b；郝德君等，2008，2009；朱诚棋等，2017）。

然而，在野外防治实践中，单萜烯类物质暴露在空气中一段时间后，会自动氧化聚合而变粘稠状，从而失去引诱松墨天牛的活性（Wang and Chi，2012）。这不仅影响了天牛引诱剂的持效性，且增加更换引诱剂的成本和工作量（朱诚棋等，2017）。在食品工业里，抑制食品氧化最常用的方法是使用抗氧化剂（翁新楚，1993）。如陈杰等（2010）比较了 2,6-二叔丁基对甲酚（BHT）、丁基羟基茴香醚（BHA）、叔丁基对苯二酚（TBHQ）、植酸（PA）等抗氧化剂对胡麻油的保护作用。结果表明 4 种抗氧化剂的抗氧化性能力强弱依次是：TBHQ>PA>BHT>BHA。利用 Schaal 烘箱法研究抗氧化剂对胡麻油货架期的影响，得出 TBHQ 可使胡麻油货架寿命延长 12 个月。王亚萍等（2010）采用 Schaal 烘箱法，以过氧化值为考察指标，研究不同抗氧化剂对山茶油抗氧化性能的影响，发现 TBHQ、PA、没食子酸丙酯（PG）、维生素 E（VE）、茶多酚（TP）5 种抗氧化剂对山茶油均有不同程度的抗氧化作用，其中 PG 对山茶油的抗氧化效果最好，能明显抑制山茶油的氧化。为此，本研究通过添加抗氧化剂的方式，对引诱剂的主要成分单萜烯进行抗氧化保护，以延长引诱剂的持效期，为更好地利用信息化学物质监测和有效控制松墨天牛提供科学依据和技术支撑。

1　材料与方法

1.1　供试试剂及仪器

α-蒎烯（99%）、β-蒎烯（98%）、月桂烯（98%）、3,3′-硫代二丙酸二月桂酯（DLTP）（>90.0%）、没食子酸丙酯（PG）（98%）、L-抗坏血酸棕榈酸酯（L-AP）（99%）由上海阿拉丁生化科技股份有限公司生产；丁基羟基茴香醚（BHA）（98%）、2,6-二叔丁基对甲酚（BHT）（98%）、叔丁基对苯二酚（TBHQ）（98%）由上海迈瑞尔化学技术有限公司生产。

HH-501S 循环水浴锅（金坛区金城春兰实验仪器厂）；松墨天牛引诱剂 TH-3 持久型（广州市团花生物科技有限责任公司）；气相色谱 GC-14B（日本岛津，FID）。

1.2　不同抗氧化剂对单萜烯的保护效果

参考王亚萍等（2010）的 Schaal 烘箱实验法，采用水浴锅对单萜烯进行加热、加速氧化，以单萜烯含量为考察指标，研究不同抗氧化剂对单萜烯抗氧化性能的影响。

1%的母液配制：取 99 g 单萜烯样品加入抗氧化剂 1 g，先强力搅拌 10 min，然后缓慢搅拌 20 min。在 250 mL 烧杯中，分别加入 1、2、3 g 的母液，称至 100 g 的单萜烯样品，配成设定的添加量要求（0.01%、0.02%、0.03%），搅拌均匀（约 20 min）。敞口放入 60 ℃恒温水浴锅，每隔 24 h 振荡 1 次，约 10 s，并交换样品在恒温水浴锅中的位置，整个水浴锅放置在通风橱中排气。以不加抗氧化剂的单萜烯作为对照（CK）。2 d 后取样，测定单萜烯含量，每个处理 5 次重复。

参照王政和魏莉（2014）利用 SPSS 软件实现实验中正交设计的方差分析方法，生成正交实验者列表，安排实验。本实验用 SPSS 24.0 版本。

参照周孟等（2018）采用气相色谱仪毛细管色谱柱分析进行单萜烯含量的测定。色谱柱：SE-54 毛细管柱（30 m×0. 25 mm×0. 25 μm）；流速为 1.0 mL/min；程序升温：初始温度 80 ℃，

保持 2 min，以 2 ℃/min 速率升温至 100 ℃，再以 4 ℃/min 速率升温至 200 ℃，再以 10 ℃/min 速率升温至 280 ℃；进样口温度 250 ℃；检测器（FID）温度 300 ℃；进样量 1 μL，65∶1 分流比进样。计算单萜烯含量。计算保存率和校正保存率，计算公式：

$$保存率=\left[\frac{处理后含量}{处理前初始含量}\right]\times 100\%,$$

$$校正保存率=\left[\frac{处理保存率-空白对照保存率}{100-空白对照保存率}\right]\times 100\%。$$

1.3 添加抗氧化剂的单萜烯不同时间保存率变化情况

根据 1.2 选出的抗氧化剂和浓度，添加到单萜烯中，以不加抗氧化剂的单萜烯作为对照（CK）。以此参数进行验证实验。采用 1.2 的方法，每隔 2 d 取样，测定单萜烯含量的变化情况，计算保存率。每个处理 5 次重复。

1.4 添加抗氧化剂的单萜烯对松墨天牛野外诱捕效果

将 1.2 实验获得的对单萜烯具有较好保护作用的抗氧化剂添加到自制的松墨天牛引诱剂（α-蒎烯∶β-蒎烯∶月桂烯=50∶40∶10）中，为试验组；以不加抗氧化剂的松墨天牛引诱剂（α-蒎烯∶β-蒎烯∶月桂烯=50∶40∶10）作为空白对照组；装入聚乙烯缓释瓶中进行野外诱捕试验。另设松墨天牛引诱剂 TH-3 持久型为对照药组（聚乙烯缓释瓶包装），每个处理挂 10 个诱捕器。其中对照药组 1 个月更换 1 次，试验组和空白对照组中途不换药。

试验点位于广州市流溪河国家森林公园内，试验林地为松阔混交林，其中马尾松 *Pinus massoniana* 为优势种，林下郁闭度较高，林中发现较多死亡株和濒危株，且受到松墨天牛危害严重。试验选择松墨天牛成虫的活动高峰期，从 2019 年 4 月 1 日开始，至 2019 年 8 月 1 日结束。每 5 d 调查 1 次诱捕到的天牛，记录诱捕数量。

1.5 数据处理与分析

应用 SPSS 24.0 软件对实验数据进行一般线性模型单变量分析，校正保存率为因变量，单萜烯、抗氧化剂、浓度为固定因子，选择定制交互模型，对实测平均值进行事后多重比较（R-E-G-W 范围）处理，$P<0.05$ 为差异具有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 不同抗氧化剂对单萜烯的保护效果

不同抗氧化剂处理对单萜烯的保护效果见表 1（正交实验者列表与结果）。对表 1 的实验结果进行方差分析，结果表明单萜烯（F=38.418，P=0.000）、抗氧化剂（F=3.231，P=0.031）和浓度（F=6.631，P=0.007）对校正保存率在 5%水平上均有显著的差异。其中 TBHQ 对单萜烯的保护效果最显著（P<0.05），然后是 BHA、BHT、PG、LAP（P=0.271），最后是 DLTP（P=0.336）。浓度对单萜烯的保护效果影响显著，其中 0.03%浓度效果最显著（P<0.05），0.02%和 0.01%之间保护效果差异不显著（P=0.201）。抗氧化剂对 α-蒎烯、β-蒎烯和月桂烯的保护效果存在显著差别，抗氧化剂对 β-蒎烯的保护效果最显著，然后是 α-蒎烯，最后是月桂烯（P<0.05）。经方差分析得出对单萜烯的保护效果最佳的抗氧化剂是 TBHQ，添加量为 0.03%。

2.2 添加 0.03% TBHQ 的单萜烯在不同时间保存率变化情况

选用最优的抗氧剂 TBHQ，添加量为 0.03%，在加速氧化条件下，研究 TBHQ 对 α-蒎烯、β-蒎烯和月桂烯含量变化的影响。结果表明 TBHQ 对这 3 种单萜烯有明显的抗氧化作用（图 1）。添加 TBHQ 的单萜烯保存率一直比较稳定，而不加 TBHQ 的单萜烯其保存率下降很快。加速氧化第 8 天，添加抗氧化 TBHQ 的单萜烯保存率达到 87.31%以上，而不加抗氧化剂的单萜烯保存率低于 56.66%。

2.3 添加 0.03% TBHQ 的单萜烯对松墨天牛野外诱捕效果的影响

利用添加 0.03% TBHQ 的单萜烯试验组对

表 1　正交试验设计与结果

Table 1　Orthogonal test design and result

列号 Identification cards	单萜烯 Monoterpenes	抗氧化剂 Antioxidants	浓度（%） Concentration (%)	校正保存率（%） Calibration of retention rate (%)
1	α-蒎烯 α-Pinene	BHA	0.03	18.02±3.49
2	β-蒎烯 β-Pinene	DLTP	0.01	15.68±3.58
3	β-蒎烯 β-Pinene	PG	0.01	33.38±5.58
4	β-蒎烯 β-Pinene	BHT	0.03	46.12±7.77
5	α-蒎烯 α-Pinene	TBHQ	0.01	20.21±3.16
6	月桂烯 Myrcene	TBHQ	0.02	13.08±0.96
7	α-蒎烯 α-Pinene	BHT	0.01	11.63±2.40
8	β-蒎烯 β-Pinene	BHA	0.02	37.06±6.40
9	β-蒎烯 β-Pinene	BHA	0.03	47.54±8.01
10	α-蒎烯 α-Pinene	BHT	0.03	18.42±3.61
11	β-蒎烯 β-Pinene	TBHQ	0.02	40.60±5.11
12	月桂烯 Myrcene	BHA	0.01	12.16±1.06
13	α-蒎烯 α-Pinene	L-AP	0.02	16.72±2.95
14	月桂烯 Myrcene	BHT	0.01	12.81±1.05
15	月桂烯 Myrcene	PG	0.03	11.63±0.96
16	β-蒎烯 β-Pinene	L-AP	0.01	31.36±4.01
17	α-蒎烯 α-Pinene	TBHQ	0.03	49.44±5.96
18	β-蒎烯 β-Pinene	TBHQ	0.03	47.60±8.05
19	月桂烯 Myrcene	L-AP	0.03	11.55±0.97
20	月桂烯 Myrcene	BHA	0.02	12.33±1.00
21	月桂烯 Myrcene	TBHQ	0.01	12.28±0.99
22	β-蒎烯 β-Pinene	BHT	0.02	37.49±6.53
23	α-蒎烯 α-Pinene	BHA	0.01	16.14±2.70
24	α-蒎烯 α-Pinene	DLTP	0.02	15.18±2.85
25	月桂烯 Myrcene	DLTP	0.03	11.04±0.94
26	月桂烯 Myrcene	BHT	0.02	11.58±1.02
27	α-蒎烯 α-Pinene	PG	0.02	16.96±2.97

表中数据为平均值±标准差（n=5）。表中抗氧化剂全称：3,3′-硫代二丙酸二月桂酯（Didodecyl 3,3'-Thiodipropionate，DLTP），没食子酸丙酯（Propyl gallate，PG）, L-抗坏血酸棕榈酸酯（L-Ascorbic acid 6-palmitate，L-AP），丁基羟基茴香醚（Butylated hydroxyanisole，BHA）, 2,6-二叔丁基对甲酚（2,6-Di-tert-butyl-4-methylphenol，BHT），叔丁基对苯二酚（tert-Butylhydroquinone，TBHQ）。

Data in the talbe are mean±SD (n=5). The full names of antioxidants in the table：Didodecyl 3,3'-Thiodipropionate (DLTP), Propyl gallate (PG), L-Ascorbic acid 6-palmitate (L-AP), Butylated hydroxyanisole (BHA), 2,6-Di-tert-butyl-4-methylphenol (BHT), tert-Butylhydroquinone (TBHQ).

松墨天牛进行林间诱捕防治试验，诱虫量显示林间的松墨天牛数量在 4 月底 5 月初出现第 1 个发生高峰，6 月底 7 月初第 2 个发生高峰。对照药组（1 个月更换 1 次诱剂）的试验结果显示松墨

天牛数量也存在 2 个发生高峰。而空白对照组的诱虫量在仅在 5 月份出现 1 个高峰（图 2）。这一结果表明不添加抗氧化剂 TBHQ 的单萜烯（空白对照）在 7 月份已经失去了对松墨天牛的引诱能力，而添加抗氧化剂 TBHQ 的单萜烯对松墨天牛野外诱捕持效期明显延长，持效期延长不少于 30 d。观察诱捕量的变化曲线，发现试验组的曲线变化比较圆滑稳定，而空白对照的曲线变化则非常不稳定。与空白对照组相比，试验组的松墨天牛诱虫量比较稳定，诱虫总数是空白对照组的 1.60 倍（图 2）。这也说明添加抗氧化剂 TBHQ 的单萜烯引诱剂成分稳定、持效期长。

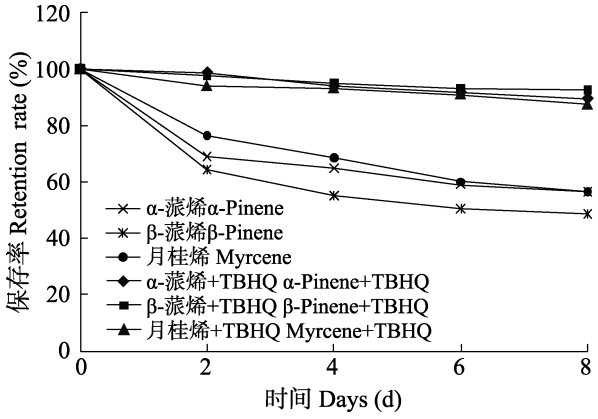

图 1　添加 0.03% TBHQ 的单萜烯在不同时间保存率变化情况

Fig. 1　The retention rate of monoterpenes added with 0.03% TBHQ at different times

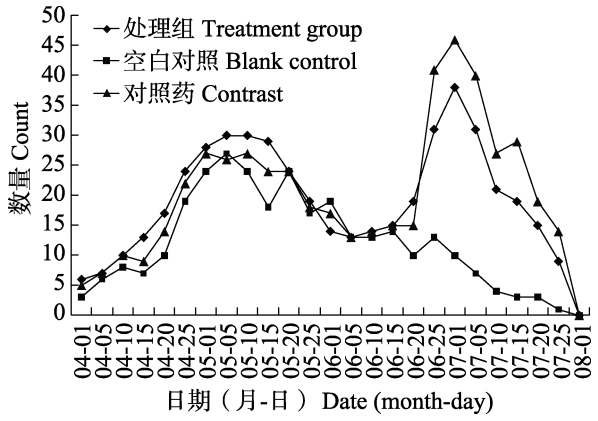

图 2　添加 0.03% TBHQ 的单萜烯对松墨天牛的野外诱捕效果

Fig. 2　Effect of monoterpene added with 0.03% TBHQ on field trapping of *Monochamus alternatus*

3　结论与讨论

单萜烯氧化后会引起昆虫引诱剂成分的变化，而成分的变化则影响引诱剂对害虫的引诱效果。如 Erbilgin 等（2007）报道发现，引诱松墨天牛的主要信息化合物 α-蒎烯，它的相对含量保持稳定是发挥引诱作用的关键。胡琴等（2018）也报道松墨天牛诱芯中引诱剂在野外条件下各成分之间的比例发生变化，主要成分 α-蒎烯发生氧化，影响了诱捕效果。

合成抗氧剂以其具有高效、价廉、耐高温等特点，被广泛应用到油脂工业中，如在食用油添加抗氧化剂防止酸败延长货架时间（蔡新华和钱小君，2013）。通过添加抗氧化剂改变生物柴油的酸值与过氧化值，提高生物柴油的氧化稳定性，从而极大改善生物柴油的品质（李雪梅等，2010）。本研究通过添加抗氧化剂来保护单萜烯类引诱剂，解决引诱剂成分的变化和维持引诱剂的稳定性问题。试验中选择了 6 种合成抗氧剂，这 6 种抗氧化剂均易溶于单萜烯，而且可以有效阻止单萜烯的氧化，从而提高单萜烯类物质的稳定性。在供试的 6 种抗氧化剂中，TBHQ 对单萜烯的保护效果最显著（$P<0.05$）。

单萜烯在野外条件下的稳定性会影响对松墨天牛的引诱效果，常用的解决办法是通过缓释材料来保持单萜烯的稳定性，如朱诚棋等（2017）研究了常用的 3 种缓释载体对松墨天牛引诱剂的释放速率并检测了载体内引诱剂成分的变化，发现在聚乙烯缓释瓶（LDPE）、聚乙烯管（PE）、APF-Ⅰ型材料中，α-蒎烯的相对含量下降率分别为 97.39%，54.43%，61.24%。本研究把 α-蒎烯（敞口烧杯中）进行高温加速氧化（60 ℃）到第 8 天，添加抗氧化 TBHQ 的 α-蒎烯保存率达到 89.55%，而不加抗氧化剂的 α-蒎烯保存率仅为 56.51%。赵锦年等（2011）通过添加微晶碳素和膨润土作为缓释基质来保护单萜烯引诱剂的活性，添加缓释基质的引诱剂日均释放量仅为原型引诱剂的 25.00%，前者平均诱捕松墨天牛成虫 44.7 头，后者 47.2 头，缓释型引诱剂比原型引诱剂平均略高 2.5 头。而本研究通过添加抗氧化剂来保护单萜烯引诱剂的活性，维持单萜烯

在野外条件下的稳定性，对松墨天牛野外诱捕持效期明显延长，其持效期延长不少于 30 d，试验期间的试验组（添加抗氧化剂 TBHQ）的诱虫量总数是空白对照组（不添加抗氧化剂）的 1.60 倍，引诱松墨天牛成虫的引诱活性明显强于原型引诱剂。

本研究通过添加抗氧化剂对单萜烯进行保护，延长单萜烯在野外条件下的稳定性，保持引诱剂的成分稳定释放，可改善引诱剂缓释载体的堵塞问题，对改良以单萜烯为主要成分的森林害虫引诱剂的使用提供有益参考。

参考文献 (References)

Chen J, Zou SD, Li YC, Feng SG, Fang ZW, 2010. Study on the antioxidant activitv of the sesame oil. *Modern Food Science and Technology*, 26(9): 942–943. [陈杰, 邹树丹, 李一聪, 冯少光, 方志伟, 2010. 胡麻油的抗氧化性研究. 现代食品科技, 26(9): 942–943.]

Cai XH, Qian XJ, 2013. Research progress on antioxidants of oils and fats. *Cereal and Food Industry*, 20(4): 33–36. [蔡新华, 钱小君, 2013. 油脂抗氧化剂的研究进展. 粮食与食品工业, 20(4): 33–36.]

Cheng XY, Xu RM, Xie BY, 2005. The role of chemical communication in the infection and spread of pine wood nematodes (*Bursaphelenchus xylophilus*). *Acta Ecologica Sinica*, 25(2): 339–345. [成新跃, 徐汝梅, 谢丙炎, 2005. 化学通讯在松材线虫侵染和扩散中的作用. 生态学报, 25(2): 339–345.]

Erbilgin N, Krokene P, Kvamme T, Christiansen E, 2007. A host monoterpene influences *Ips typographus* (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) responses to its aggregation pheromone. *Agricultural and Forest Entomology*, 9(2): 135–140.

Fan JT, Kang L, Sun JH, 2007a. Role of host volatiles inmate location by the Japanese pine sawyer, *Monochamus alternatus* Hope (Coleoptera: Cerambycidae). *Environmental Entomology*, 36(1): 58–63.

Fan JT, Sun JH, Shi J, 2007b. Attraction of the Japanesepine sawyer, *Monochamus alternatus*, to volatiles fromstressed host in China. *Annals of Forest Science*, 64(1): 67–71.

Hao DJ, Fan BQ, Tang JG, Wang Y, Ma FL, 2009. Screening of attractants for *Monochamus alternatus* and its attraction effects. *Journal of Northeast Forestry University*, 37(11): 86–87. [郝德君, 樊斌琦, 唐进根, 王焱, 马凤林, 2009. 松墨天牛引诱剂的筛选及其引诱作用. 东北林业大学学报, 37(11): 86–87.]

Hao DJ, Yang JX, Dai HG, 2008. Research progress and prospect on chemical ecology of *Monochamus alternatus*. *Chinese Journal of Ecology*, 27 (7): 1227–1233. [郝德君, 杨剑霞, 戴华国, 2008. 松墨天牛化学生态学. 生态学杂志, 27 (7): 1227–1233.]

Hu Q, Jin J, Du YB, Fan JT, 2018. Variation of the composition of attractants in lures for *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae) in the field and its influence on trapping efficacy. *Acta Entomologica Sinica*, 61(11): 1310–1318. [胡琴, 金京, 杜永斌, 樊建庭, 2018. 野外条件下松墨天牛诱芯中引诱剂成分变化及其对诱捕效果的影响. 昆虫学报, 61(11): 1310–1318.]

Hu CX, Su XL, Zhang YQ, 2003. Research advances of *Monochamus alternatus* Hope in China. *Hebei Journal of Forestry and Orchard Research*, 18(3): 293–298. [胡长效, 苏新林, 张艳秋, 2003. 我国松墨天牛研究进展. 河北林果研究, 18(3): 293–298.]

Li XM, Liu SQ, Ao XY, Liu XY, Fu H, 2010. Research progress on antioxidation of biodiesel. *Biomass Chemical Engineering*, 44(4): 56–59. [李雪梅, 刘守庆, 敖新宇, 刘祥义, 付惠, 2010. 生物柴油的抗氧化研究进展. 生物质化学工程, 44(4): 56–59.]

Wang D, Chi DF, 2012. Morphology and release profile of microcapsules encapsulated Alpha-Pinene by complex coacervation. *Advanced Materials Research,* 602-604: 1285–1288.

Wang YP, Fang XZ, Nie M, Wang KL, Yao XH, 2010. Antioxidation of several antioxidants on camellia seed oil. *China Oils and Fats*, 35(1): 47–50. [王亚萍, 方学智, 聂明, 王开良, 姚小华, 2010. 几种抗氧化剂对山茶油的氧化抑制作用研究. 中国油脂, 35(1): 47–50.]

Wang Z, Wei L, 2014. Using SPSS software achieve pharmacy experiment orthogonal design's variance analysis. *Journal of Mathematical Medicine*, 27(1): 99–102. [王政, 魏莉, 2014. 利用 SPSS 软件实现药学实验中正交设计的方差分析. 数理医药学杂志, 27(1): 99–102.]

Weng XC, 1993. Antioxidants and their antioxidation mechanism. *Journal of Zhengzhou Grain College*, (3): 20–29. [翁新楚, 1993. 抗氧化剂及其抗氧化机制. 郑州工程学院学报, (3): 20–29.]

Yang BJ, Pan HY, Tang J, Wang YY, Wang LF, 2003. *Bursaphelenchus xylophilus*. Beijing: Chinese Forests Press.1–263. [杨宝君, 潘宏阳, 汤坚, 王玉嫣, 汪来发, 2003. 松材线虫病. 北京: 中国林业出版社. 1–263.]

Zhao JN, Jiang P, Zhang XY, Lin YH, Huang ZG, He YY, 2011. Studies on *Monochamus alternatus* attractant and the attractability. *Forest Research*, 24(3): 350–356. [赵锦年, 蒋平, 张星耀, 林云华, 黄照岗, 何玉友, 2011. 松褐天牛缓释型引诱剂及其引诱效果研究. 林业科学研究, 24(3): 350–356.]

Zhou M, Liao XM, Wang S, Yang X, Li YJ, Gong ZP, Zhang RH, 2018. Gas chromatography determination of α tpinene contentin Chinese pine by internal standard method. *Chinese Journal of Ethnomedicine and Ethnopharmacy*, 27(6): 10–14. [周孟, 廖祥明, 王珊, 杨雄, 李勇军, 巩仔鹏, 张荣红, 2018. 气相色谱内标法测定松节中α-蒎烯的含量. 中国民族民间医药, 27(6): 10–14.]

Zhu CQ, Chen JY, Ma T, Mou J, Qin WQ, Wen XJ, 2017. Research on release rates of semiochemicals of *Monochamus alternatus*. *Forest Research*, 30(2): 315–321. [朱诚棋, 陈家颖, 马涛, 牟静, 秦文权, 温秀军, 2017. 松墨天牛信息化合物在不同缓释载体上的释放速率. 林业科学研究, 30(2): 315–321.]