

黑翅土白蚁表皮碳氢化合物的品级特征*

杨锦锦^{1**} 嵇保中^{1***} 刘曙雯^{2***} 张新慰¹ 王丽平¹
赵正萍¹ 丁芳¹ 王亚召¹

(1. 南方现代林业协同创新中心, 南京林业大学林学院, 南京 210037; 2. 南京中山陵园管理局, 南京 210014)

摘要 【目的】探索黑翅土白蚁 *Odontotermes formosanus* (Shiraki) 表皮碳氢化合物的品级特征。

【方法】应用固相微萃取、气相色谱和气相色谱-质谱联用等技术, 对不同品级、不同龄期个体表皮碳氢化合物进行检测。【结果】工蚁、兵蚁、幼蚁、长翅生殖蚁表皮碳氢化合物组分种类相同(32种), 主要为正烷烃、支链烷烃和烯烃等。非生殖品级中组分含量变化特点表现在, 工蚁(大工蚁和小工蚁): 1-十九碳一烯显著低于幼蚁和兵蚁; 大工蚁: 三十一烷、三十四烷显著低于小工蚁和幼蚁; 小工蚁(巢内工蚁): 2,8,8-三甲基十烷显著高于、十六烷和十八烷低于其他非生殖品级; 兵蚁: 十四烷显著低于、2-me-1-C₁₉:1 高于其他非生殖品级, 三十一烷、三十四烷显著低于小工蚁和幼蚁; 1龄幼蚁: 十六烷高于其他非生殖品级; 2龄幼蚁: (E)-9-4-meC₁₈ 高于其他非生殖品级; 3龄幼蚁: 1-十九碳一烯、四十四烷高于其他非生殖品级; 此外, 1龄、2龄、3龄幼蚁的 3,3,6-三甲基十烷、2-me-(E)-7-C₁₆:1 显著高于、8-十七碳一烯显著低于其他非生殖品级。生殖品级与非生殖品级比较, 十二烷、十四烷、十七烷、三十一烷、2,8,8-三甲基十烷、8-乙基十五烷、2,6-二甲基十七烷、8-十七碳一烯、1-十七碳一烯、1-十八碳一烯、9-十九碳一烯的含量差异显著。【结论】黑翅土白蚁不同品级个体表皮碳氢化合物种类相同, 组分含量存在差异, 可用于巢内品级间识别。不同龄幼蚁和不同发育阶段工蚁, 表皮碳氢化合物存在特征性组分含量, 表皮碳氢化合物分泌随个体发育而改变。

关键词 黑翅土白蚁, 表皮碳氢化合物, 非生殖品级, 生殖品级

Caste characteristics of cuticular hydrocarbon in *Odontotermes formosanus* (Shiraki)

YANG Jin-Jin^{1**} JI Bao-Zhong^{1***} LIU Shu-Wen^{2***} ZHANG Xin-Wei¹ WANG Li-Ping¹
ZHAO Zheng-Ping¹ DING Fang¹ WANG Ya-Zhao¹

(1. Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, College of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. The Administration Bureau of Dr. Sun Yat-sen's Mausoleum, Nanjing 210014, China)

Abstract [Objectives] To explore the caste characteristics of cuticular hydrocarbons in *Odontotermes formosanus*. [Methods] Cuticular hydrocarbons of individuals of different castes and instars were analyzed using solid phase microextraction, gas chromatography and gas chromatography-mass spectrometry. [Results] The cuticular hydrocarbon of workers, soldiers, larvae and alates had the same 32 components; mainly n-alkanes, branched alkanes and alkenes etc. Changes in the amount of some components in non-reproductive individuals can be summarized as follows: In workers (both major and minor workers), 1-C₁₉:1 was significantly lower than in larvae and soldiers. In major workers, C₃₁ and C₃₄ were significantly lower than in minor workers and larvae. In minor workers (living in the nest), 2,8,8-trimethyldecane was significantly higher, and C₁₆

* 资助项目 Supported projects :高等学校博士学科点专项科研基金项目(20123204110001);江苏省自然科学基金项目(BK2012816);南京市建委、中山陵园管理局资助课题(200409);江苏省高校优势学科建设工程资助项目;南京林业大学南方现代林业协同创新中心资助项目

**第一作者 First author, E-mail: brocadeyang@126.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: jbz9885@njfu.edu.cn; liushuwen2006@163.com

收稿日期 Received: 2015-06-23, 接受日期 Accepted: 2015-06-30

and C_{18} significantly lower, than in other non-reproductive individuals. In soldiers, C_{14} was significantly lower, and 2-me-1- $C_{19}:1$ higher, than in other non-reproductive individuals, and C_{31} and C_{34} were significantly lower than in minor workers and larvae. In 1st instar larvae, C_{16} was higher than in other non-reproductive individuals. In 2nd instar larvae, (E)-9-4-me C_{18} was higher than in other non-reproductive individuals. In 3rd instar larvae, 1- $C_{19}:1$ and C_{44} were higher than in other non-reproductive individuals. Furthermore, in 1st, 2nd, and 3rd instar larvae, 3,3,6-trime C_{10} and 2-me-(E)-7- $C_{16}:1$ were higher, and 8- $C_{17}:1$ was significantly lower, than in other non-reproductive individuals. There were significant differences in the amounts of the components C_{12} , C_{14} , C_{17} , C_{31} , 2,8,8-trime C_{10} , 8-ethyl C_{15} , 2,6-dime C_{17} , 8- $C_{17}:1$, 1- $C_{17}:1$, 1- $C_{18}:1$ and 9- $C_{19}:1$ between reproductive and non-reproductive individuals. **[Conclusion]** The cuticular hydrocarbons of different castes of *O. formosanus* have the same components, but the amounts of some components differed significantly among different castes. Cuticular hydrocarbons can be used as an important caste-recognition cue in *O. formosanus*. The cuticular hydrocarbons of different larval instars and workers of different developmental stages had distinctive compositions. The secretion of cuticular hydrocarbons changed with developmental stage.

Key words *Odontotermes formosanus*, cuticular hydrocarbon, non-reproductive, reproductive

昆虫表皮碳氢化合物 (Cuticular hydrocarbon, CHC), 是昆虫上表皮中直链或支链、饱和或不饱和烃类混合物, 是昆虫表皮蜡层的主要成分 (杜国兴等, 2006), 其主要成分包括碳氢化合物、相应链长的醇或醛、饱和或不饱和的脂肪酸及由饱和醇和饱和酸形成的酯 (高明媛, 2001)。昆虫表皮碳氢化合物的基本功能是在体表形成疏水层, 减少体内水分散失并防止有害物质 (如农药) 和病原微生物入侵 (Drijfhout, 2010)。在许多昆虫和节肢动物中, 表皮碳氢化合物还是一类信息化合物 (Martin and Drijfhout, 2009)。

个体识别是社会性昆虫一项基本且重要的能力, 其一般表现为巢群内个体相互合作和利它, 巢群间个体相互排斥或发生格斗 (陈艳, 2007)。Howard 等 (1982) 提出白蚁表皮碳氢化合物可用于种间和品级间个体的识别, 是白蚁进行个体识别的重要组分。许多学者开展了进一步研究, 大多获得了支持性结果 (Haverty *et al.*, 1988; Bagnères *et al.*, 1991; Takahashi and Gassa, 1995)。Bagnères 等 (1998) 建立人工神经网络模型, 尝试用非线性的数学方法, 即“人工神经网络” (Artificial neural network, ANN), 模拟散白蚁属 4 种白蚁的种群识别气味, 对工蚁和兵蚁间的品级识别; 工蚁、兵蚁、若蚁和补充生殖蚁间的品级识别和近缘种间的识别进行实验, 证明非线性数学分析方法可用于白蚁

基于表皮碳氢化合物进行的品级识别, 也说明了表皮碳氢化合物可用于白蚁的品级间识别。Weil 等 (2009) 对堆砂白蚁 *Cryptotermes secundus* 表皮碳氢化合物进行研究, 发现幼态生殖蚁和拟工蚁表皮碳氢化合物在组分上有明显差异。工蚁的表皮碳氢化合物有 3 个特有峰, 而幼态生殖蚁有 22 个特有峰, 除长链烯烃和正三十一烷烃外, 1-甲基支链烯烃也是幼态生殖蚁的特有组分。梁小松 (2007) 对椰子锯白蚁 *Microcerotermes biroi*、栗褐须白蚁 *Hospitalitermes jepsoni*、近明大白蚁 *Macrotermes subhyalinus*、巴布亚新白蚁 *Neotermes papura*、圣克鲁斯新白蚁 *N. santae-crusis*、截头堆砂白蚁 *Cryptotermes domesticus* 和乳白蚁属部分种类 *Coptotermes* spp. 工蚁表皮碳氢化合物进行了检测分析。张红兵等 (2005) 对散白蚁属部分种类 *Reticulitermes* spp. 和异白蚁属部分种类 *Heterotermes* spp. 工蚁的表皮碳氢化合物进行检测。本文以黑翅土白蚁为对象, 应用顶空固相微萃取、气相色谱-质谱联用等技术对不同品级、不同龄期个体的表皮碳氢化合物进行检测, 在确定表皮碳氢化合物组分的基础上, 分析不同品级、不同龄期间个体表皮碳氢化合物的差异。本研究可作为表皮碳氢化合物与品级间个体识别关系、品级分化机理等研究的参考。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

在南京林业大学北大山树木园、紫金山寻找野外蚁巢,发现白蚁后初步判断白蚁种类,收集采食工蚁,并根据其取食迹象寻找主巢进行挖掘。蚁巢挖开后,带薄塑胶手套将含有各龄期、各品级个体的大块菌圃小心取出,放入已消毒并垫有潮湿泥土的塑料箱(30 cm×50 cm×65 cm)内,迅速盖好盖子放置树荫下。将带有幼蚁、卵和工蚁兵蚁的小块碎菌圃分别放入垫有潮湿滤纸的2个小桶(Φ20 cm)中(外有黑色塑料袋避光)盖上盖子,将长翅生殖蚁放入袋子中,带回实验室待用。在显微镜下,通过兵蚁确定白蚁种类后,将各品级个体(除蚁王、蚁后)从菌圃内挑出,放置于底部垫潮湿滤纸的培养皿内,实验室黑暗环境下静置待测。

1.2 试验仪器

手动 SPME 进样器,萃取头:100 μm PDMS(聚二甲基硅氧烷)(美国 Supleco 公司)。HP6890N 气相色谱仪(GC)(美国 Aglient 公司),色谱柱 HP-5(5%苯基)-甲基聚硅氧烷(0.25 μm)毛细管柱(30 m, 0.32 mm id)(美国 Aglient 公司)。气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)为 HP7890A 气相色谱仪与 5975C 质谱仪联用(美国 Aglient 公司),色谱柱 HP-5ms 100%(5%苯基)-甲基聚硅氧烷(0.25 μm)毛细管柱(30 m, 0.25 mm id)(美国 Aglient 公司)。体视显微镜(JSZ6, 江南光学仪器厂)。

1.3 表皮碳氢化合物测定条件

GC 条件:进样口温度为 250 ,初始炉温 60 保持 1 min,以 10 /min 升温到 100 ,5 /min 升温到 150 ,然后以 3 /min 升温到 250 ,最后再以 10 /min 升温到 280 保持 5 min。载气为高纯度的 N₂,恒流 1.2 mL/min。氢气流量为 30 mL/min,空气流量为 400 mL/min。

GC-MS 条件:进样口温度为 250 ,升温程序同 GC,载气为高纯度的 He,恒流 1.2 mL/min。

电子电离(EI):70 eV,质谱扫描范围为 40~750 (m/z)。

1.4 黑翅土白蚁表皮碳氢化合物检测

由于黑翅土白蚁不同品级个体体积与表皮蜡层厚度存在差异,部分品级试虫数量有限,所以结合前期实验并参考 Bland 等(2001)的实验方法,本实验使用 5 mL 样品瓶,样品量定为非生殖品级个体取 0.15 g 作为每次的样品量。

取出巢圃中各龄期幼蚁置于 8~50 倍的体视显微镜一定倍数下,用 CCD(型号 DT-300)电脑数码图像采集,物镜尺定标,电脑图像分析软件(IPM 6.0)观察测量不同来源幼蚁的体长、头宽、触角节数量和触角长度,对幼蚁进行龄期划分。分别取活力较好的各品级个体(各龄期幼蚁、小工蚁(巢内)、大工蚁、兵蚁)0.15 g、雌、雄长翅生殖蚁各 5 头放入样品瓶,插入 100 μm PDMS 萃取头 60 下顶空萃取 90 min。萃取完成后退去萃取头,随即进入 GC 进样口进行解析,每次解析时间为 10 min。萃取头每次使用后,在 250 的进样口中解吸附 60 min。检测不同品级白蚁的表皮碳氢化合物。

2 结果与分析

2.1 非生殖品级表皮碳氢化合物

对多巢黑翅土白蚁幼蚁的体长、头宽、触角节数量、触角长度测量分析发现,黑翅土白蚁幼蚁可分为 3 个龄期:第 1 龄幼蚁头宽为(0.482±0.004) mm,第 2 龄幼蚁头宽为(0.674±0.003) mm,第 3 龄幼蚁头宽为(1.015±0.008) mm。

按上述 GC-MS 条件对表皮碳氢化合物进行分析鉴定,采用峰面积归一化法求出各组含量,应用气相色谱-质谱联用系统对各组分进行定性分析,并与 NIST 谱库对照,结合有关文献人工检索确定其化学组成。非生殖品级个体在顶空固相微萃取条件下共获得 32 种表皮碳氢化合物(表 1),主要为正烷烃、支链烷烃、烯烃等。不同非生殖品级个体表皮碳氢化合物组分相同,

表 1 黑翅土白蚁非生殖品级表皮碳氢化合物
Table 1 Cuticular hydrocarbons of non-reproductive castes in *Odontotermes formosanus*

表皮碳氢化合物 CHC	含量 (%) Relative contents (%)					
	大工蚁 Major workers	小工蚁 Minor workers	1 龄幼蚁 The 1 st instar larvae	2 龄幼蚁 The 2 nd instar larvae	3 龄幼蚁 The 3 rd instar larvae	兵蚁 Soldiers
C ₁₂	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
C ₁₄	36.156±7.803	41.174±7.318	40.392±8.162	35.900±6.777	36.038±6.188	17.197±3.147
2,8,8-trimeC ₁₀	2.131±0.704	10.794±3.648	4.409±0.617	2.635±0.163	3.202±0.275	1.641±0.412
3,3,6-trimeC ₁₀	0.504±0.228	0.534±0.146	1.338±0.186	1.076±0.292	1.177±0.209	0.525±0.025
C _x -1	<0.5	<0.5	0.000	<0.5	<0.5	<0.5
C ₁₅	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
C ₁₆	1.321±0.493	<0.5	3.341±0.653	1.928±0.400	1.454±0.086	1.264±0.155
8-ethylC ₁₅	0.509±0.189	<0.5	0.591±0.111	0.775±0.170	0.586±0.047	<0.5
C ₁₇	6.291±0.033	19.040±3.751	10.076±1.341	8.772±1.392	10.331±0.900	20.194±4.418
8-C ₁₇ :1	26.632±6.115	18.430±4.078	0.767±0.104	3.977±0.778	1.293±0.436	29.566±5.632
1-C ₁₇ :1	<0.5	0.821±0.146	0.921±0.167	0.760±0.107	0.531±0.023	<0.5
1-C ₁₈ :1	<0.5	<0.5	<0.5	0.629±0.104	0.512±0.144	<0.5
9-meC ₁₉	3.703±0.038	1.766±0.126	5.566±0.632	4.881±0.294	2.475±0.616	3.067±0.506
2,6-dimeC ₁₇	4.279±0.912	2.033±0.137	2.177±0.418	4.557±0.330	3.729±0.814	5.741±0.936
2,6,10,14-tetrameC ₁₆	<0.5	0.703±0.129	0.946±0.093	<0.5	0.918±0.211	0.546±0.076
2-me-(E)-7-C ₁₆ :1	0.680±0.248	0.693±0.108	1.648±0.433	1.308±0.132	1.653±0.095	0.590±0.882
1-C ₁₉ :1	<0.5	<0.5	1.257±0.403	1.103±0.142	2.922±0.698	1.452±0.262
C ₂₀	1.557±0.330	0.567±0.055	0.781±0.093	1.799±0.416	1.619±0.380	1.567±0.311
2,3-dimeC ₁₉	0.611±0.293	0.367±0.034	1.003±0.233	1.044±0.213	0.936±0.105	1.511±0.325
(E)-9-4-meC ₁₈	<0.5	<0.5	0.569±0.022	0.946±0.157	0.543±0.108	<0.5
9-C ₁₉ :1	<0.5	<0.5	<0.5	0.606±0.198	0.726±0.118	0.738±0.063
C ₁₈	3.592±0.938	0.530±0.081	2.732±0.502	4.905±1.004	2.923±0.383	4.547±0.562
C ₂₁	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Unknow	0.663±0.101	0.263±0.010	0.480±0.067	0.975±0.082	0.743±0.097	0.612±0.101
2-me-7-C ₁₉ :1	0.641±0.278	1.695±0.154	0.855±0.225	0.697±0.051	0.658±0.049	<0.5
3-meC ₁₈	0.977±0.184	1.393±0.098	2.502±0.243	2.925±0.525	3.172±0.612	2.233±0.215
C ₂₄	0.945±0.129	1.004±0.153	1.106±0.117	1.828±0.476	2.034±0.324	0.742±0.086
2-me-1-C ₁₉ :1	0.566±0.166	<0.5	<0.5	0.577±0.177	<0.5	2.572±0.465
C ₂₈	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
C ₃₁	<0.5	1.026±0.116	2.608±0.375	3.300±0.240	5.624±1.009	<0.5
C ₃₄	<0.5	1.095±0.144	2.463±0.614	4.352±0.774	4.812±1.066	<0.5
C ₄₄	1.114±0.098	1.405±0.149	2.468±0.399	2.742±0.505	3.923±0.622	1.647±0.226

表中数据为平均值±标准误 Data in the table are mean±SD; C_y: 正 Y 烷烃 n-Alkanes; -me: 单甲基 -Methyl; -dime: 二甲基 -Dimethyl; -trime: 三甲基 -Trimethyl; -tetrame: 四甲基 -Tetramethyl; -ethyl: 乙基; Z/E: 分子的顺 (Z) 反 (E) 构型 Cis (Z) and trans (E) configuration of molecules; Z/E 后的数字: 双键所在位置 Number after Z and E: Double bond position.

分布规律相似：大工蚁中，十四烷（ $36.156\% \pm 7.803\%$ ）、8-十七碳一烯（ $26.632\% \pm 6.115\%$ ）、十七烷（ $6.291\% \pm 0.033\%$ ）含量最高；小工蚁中，十四烷（ $41.174\% \pm 7.318\%$ ）、十七烷（ $19.040\% \pm 3.751\%$ ）、8-十七碳一烯（ $18.430\% \pm 4.078\%$ ）的含量最高；1龄幼蚁，十四烷（ $40.392\% \pm 8.162\%$ ）、十七烷（ $10.076\% \pm 1.341\%$ ）、9-甲基十九烷（ $5.566\% \pm 0.632\%$ ）的含量最高；2龄幼蚁，十四烷（ $35.900\% \pm 6.777\%$ ）、十七烷（ $8.772\% \pm 1.392\%$ ）、十八烷（ $4.905\% \pm 1.004\%$ ）的含量最高；3龄幼蚁，十四烷（ $36.038\% \pm 6.188\%$ ）、十七烷（ $10.331\% \pm 0.900\%$ ）、三十一烷（ $5.624\% \pm 1.009\%$ ）的含量最高；兵蚁 8-十七碳一烯（ $29.566\% \pm 5.632\%$ ）、十七烷（ $20.194\% \pm 4.418\%$ ）、十四烷（ $17.197\% \pm 3.147\%$ ）的含量最高。

非生殖品级个体表皮碳氢化合物中，部分组分的含量在不同品级、龄期间存在差异。从表 1 可以看出，工蚁中，1-十九碳一烯的含量显著低于幼蚁和兵蚁；小工蚁（巢内）中，2,8,8-三甲基十烷的含量显著高于其他非生殖品级，十六烷、十八烷低于其他非生殖品级；兵蚁中，十四烷含量显著低于其他非生殖品级，2-me-1-C₁₉:1 高与其他非生殖品级；1龄幼蚁，十六烷含量高于其他非生殖品级；2龄幼蚁，(E)-9-4-meC₁₈ 含量高于其他非生殖品级；3龄幼蚁，1-十九碳一烯、四十四烷含量高于其他非生殖品级。此外，1龄、2龄、3龄幼蚁中，3,3,6-三甲基十烷、2-me-(E)-7-C₁₆:1 的含量均显著高于其他非生殖品级，8-十七碳一烯显著低于其他非生殖品级；大工蚁和兵蚁中，三十一烷、三十四烷的含量远低于其他非生殖品级。

2.2 生殖品级表皮碳氢化合物

黑翅土白蚁雌、雄长翅生殖蚁表皮碳氢化合物组分相同，各组分含量相似。与非生殖品级相比，生殖品级个体检测到的组分与非生殖品级个体相同，多数组分的含量存在显著差异（图 1）。生殖品级中，雌、雄个体含量最高的组分分别为十二烷（ 16.040 ± 4.633 ； 15.241 ± 4.116 ）、1-十八

碳一烯（ 9.203 ± 2.866 ； 9.584 ± 1.483 ）和 8-乙基十五烷（ 8.655 ± 1.912 ； 8.896 ± 1.236 ），这 3 种组分在黑翅土白蚁非生殖品级中含量均极低。此外，十四烷、十七烷、8-十七碳一烯和 2,8,8-三甲基十烷在黑翅土白蚁非生殖品级中组分含量较高，但生殖品级个体中含量较低；1-十七碳一烯、(E)-9-4-meC₁₈、2,6-二甲基十七烷、三十一烷的组分含量在生殖品级和非生殖品级个体间也存在明显差异。

3 讨论

Howard 等（1982）曾采用正己烷有机溶剂萃取，对南方散白蚁 *Reticulitermes virginicus* 工蚁、兵蚁、若蚁、幼态的生殖蚁的表皮碳氢化合物进行检测，发现南方散白蚁所测品级均含有相同的表皮碳氢化合物组分，但相同组分的含量在不同品级间存在差异。Klochkov 等（2005）对黄颈木白蚁 *Kaloterms flavicollis* 中伪工蚁（*Pseudoergates*）、若蚁、兵蚁和长翅生殖蚁进行检测，对欧洲散白蚁 *R. lucifugus* 中工蚁、若蚁、兵蚁和长翅生殖蚁的表皮碳氢化合物进行检测，同样发现不同品级的个体具有相同的表皮碳氢化合物组分，组分的含量在品级间存在差异。本文的研究结果与上述研究基本一致，说明表皮碳氢化合物在品级和不同发育阶段个体间识别的基础，主要是不同组分含量的差异。

Liebig 等（2009，2012）采用正己烷萃取法对内华达动白蚁 *Zootermopsis nevadensis* 表皮碳氢化合物进行研究，发现生殖蚁、工蚁和兵蚁间表皮碳氢化合物组分具有明显差异，其中 6,9-二十九碳二烯、6,9-二甲基三十一烷、6,9,17-三甲基三十二烷和 6,9,17-三甲基三十三烷仅在蚁王和蚁后中存在。本研究采用的生殖品级为长翅生殖蚁，其表皮碳氢化合物种类与非生殖品级相同，并无新组分出现。十二烷、十四烷、十七烷、三十一烷、2,8,8-三甲基十烷、8-乙基十五烷、2,6-二甲基十七烷、8-十七碳一烯、1-十七碳一烯、1-十八碳一烯、9-十九碳一烯的含量与非生殖品级显著差异。本文研究与 Liebig 等

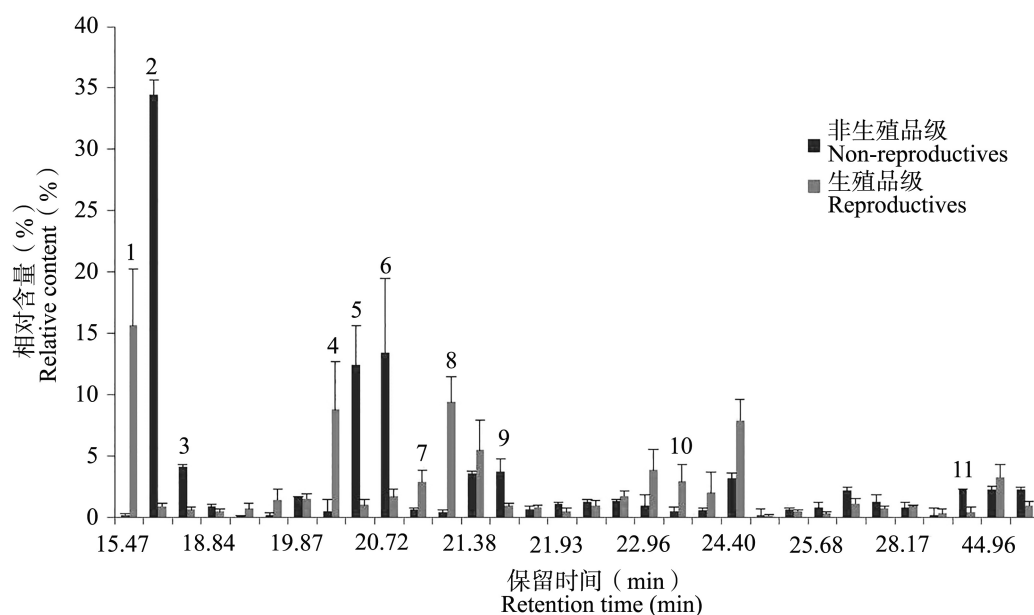
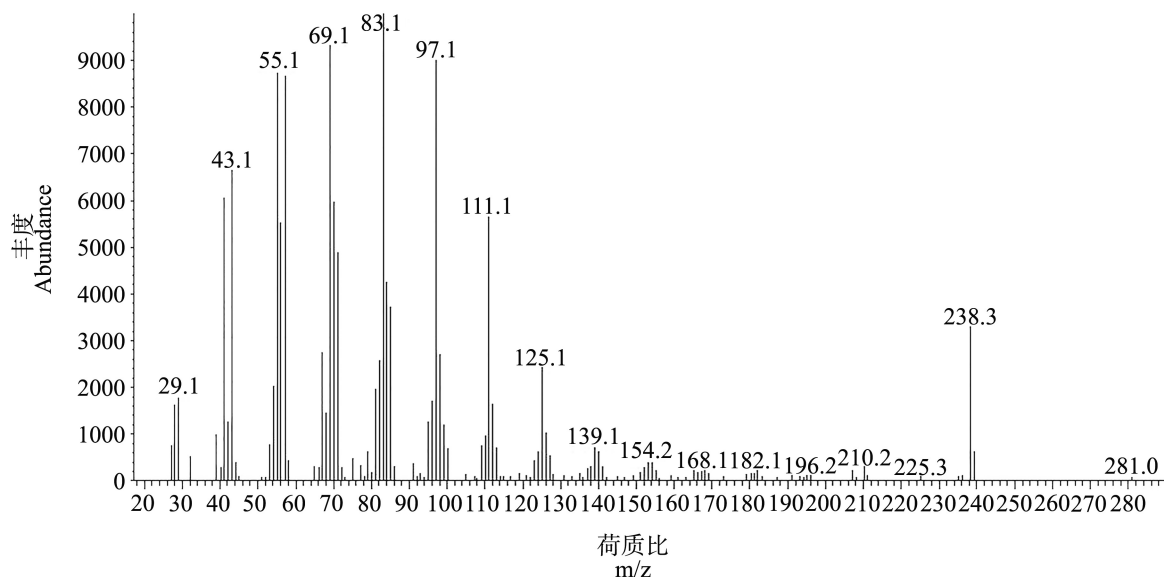


图 1 黑翅土白蚁生殖品级与非生殖品级表皮碳氢化合物组分对比

Fig. 1 The comparison of reproductives' and non-reproductives' cuticular hydrocarbon components in *Odontotermes formosanus*

1: 十二烷; 2: 十四烷; 3: 2,8,8-三甲基十烷; 4: 8-乙基十五烷; 5: 十七烷; 6: 8-十七碳一烯; 7: 1-十七碳一烯; 8: 1-十八碳一烯; 9: 2,6-二甲基十七烷; 10: (E)-9-4-甲基十八烷; 11: 三十一烷。

1: C₁₂; 2: C₁₄; 3: 2,8,8-trimethylC₁₀; 4: 8-ethylC₁₅; 5: C₁₇; 6: 8-C₁₇:1; 7: 1-C₁₇:1; 8: 1-C₁₈:1; 9: 2,6-dimethylC₁₇; 10: (E)-9-4-methylC₁₈; 11: C₃₁.

图 2 黑翅土白蚁生殖蚁中 8-C₁₇:1 GC-MS 分析质谱图Fig. 2 GC-MS analysis of 8-C₁₇:1 in *Odontotermes formosanus* reproductives

(2009, 2012)的结果存在差异,长翅生殖蚁建巢以后表皮碳氢化合物的种类及其变化,有待进一步研究。

在昆虫表皮碳氢化合物研究中,萃取时间、方式等因素均会对效果造成影响。Bland 等(2001)分别应用固相微萃取和正己烷萃取对台

湾乳白蚁 *Coptotermes formosanus* 表皮碳氢化合物进行研究,共得到表皮碳氢化合物组分 27 种。与正己烷萃取技术相比,固相微萃取技术萃取到相同目标组分的同时,得到的非目标组分更少。梁小松等(2009)应用固相微萃取对台湾乳白蚁表皮碳氢化合物进行研究,获得表皮碳氢化合物组分 24 种。可见,方法标准化是对不同研究结果进行比较分析的前提条件,针对上述情况,我们从萃取温度、萃取时间、萃取头选择、载气选择和萃取方式选择等因素对黑翅土白蚁固相微萃取条件进行优化,可供相关研究参考(杨锦锦等,2014)。

参考文献 (References)

- Bagneres AG, Killian A, Clement JL, Lange C, 1991. Interspecific recognition among termites of the genus *Reticulitermes*: evidence for a role for the cuticular hydrocarbons. *Journal of Chemical Ecology*, 17(12): 2397–2420.
- Bagnères AG, Rivière G, Clément JL, 1998. Artificial neural network modeling of caste odor discrimination based on cuticular hydrocarbons in termites. *Chemoecology*, 8(4): 201–209.
- Bland JM, Osbrink WLA, Cornelius ML, Lax AR, Vigo CB, 2001. Solid-phase microextraction for the detection of termite cuticular hydrocarbons. *Journal of Chromatography A*, 932(1/2): 119–127.
- Chen Y, 2007. Study on inter-specific competition and inter-colony competition from different colonies for *Odontotermes formosanus* (Isoptera: Termitidae). Master Degree Dissertation. Wuhan: Huazhong Agricultural University. [陈艳, 2007. 黑翅土白蚁巢群间竞争和种间竞争的研究. 硕士学位论文. 武汉: 华中农业大学.]
- Drijfhout FP, 2010. Cuticular hydrocarbons: a new tool in forensic entomology? // Amendt J, Goff ML, Campobasso CP, Grassberger M (eds.). *Current Concepts in Forensic Entomology*. Springer, Netherlands. 179–203.
- Du GX, Liu Y, Zhuang YL, 2006. Review on application of cuticular hydrocarbon analysis techniques for quarantine identification of termite. *Plant Quarantine*, 20(1): 58–60. [杜国兴, 刘勇, 庄永林, 2006. 浅析表皮碳氢化合物分析技术在白蚁检疫鉴定中的应用. *植物检疫*, 20(1): 58–60.]
- Gao MY, 2001. Application of cuticular hydrocarbon analysis to insect taxonomy. *Acta Entomologica Sinica*, 44(1): 119–122. [高明媛, 2001. 昆虫表皮中碳氢化合物在昆虫分类学中的应用. *昆虫学报*, 44(1): 119–122.]
- Haverty MI, Page M, Nelson LJ, Blomquist GJ, 1988. Cuticular hydrocarbons of dampwood termites, *Zootermopsis*: intra- and intercolony variation and potential as taxonomic characters. *Journal of Chemical Ecology*, 14(3): 1035–1058.
- Howard RW, McDaniel CA, Nelson DR, Blomquist GJ, Gelbaum LT, Zalkow LH, 1982. Cuticular hydrocarbons of *Reticulitermes virginicus* (Banks) and their role as potential species- and caste-recognition cues. *Journal of Chemical Ecology*, 8(9): 1227–1239.
- Klochov SG, Kozlovskii VI, Belyaeva NV, 2005. Caste and population specificity of termite cuticle hydrocarbons. *Chemistry of Natural Compounds*, 41(1): 1–6.
- Liang XS, 2007. Termites trap and cuticular hydrocarbons analysis in plant quarantine. Master Degree Dissertation. Nanjing: Nanjing Agricultural University. [梁小松, 2007. 白蚁诱集及生化鉴定技术在植物检疫中的应用. 硕士学位论文. 南京: 南京农业大学.]
- Liang XS, Xu LP, Li H, Sun MM, Dai HG, 2009. Solid phase microextraction for the investigation of cuticular hydrocarbon of termites. *Chinese Bulletin of Entomology*, 46(4): 632–636. [梁小松, 徐刘平, 李浩, 孙旻旻, 戴华国, 2009. 固相微萃取技术在白蚁表皮碳氢化合物分析中的应用. *昆虫知识*, 46(4): 632–636.]
- Liebig J, Eliyahu D, Brent CS, 2009. Cuticular hydrocarbon profiles indicate reproductive status in the termite *Zootermopsis nevadensis*. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 63(12): 1799–1807.
- Liebig J, Eliyahu D, Brent CS, 2012. Erratum to: cuticular hydrocarbon profiles indicate reproductive status in the termite *Zootermopsis nevadensis*. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 66(7): 1095.
- Martin S, Drijfhout F, 2009. A review of ant cuticular hydrocarbons. *Journal of Chemical Ecology*, 35(10): 1151–1161.
- Takahashi S, Gassa A, 1995. Roles of cuticular hydrocarbons in intra- and interspecific recognition behavior of two *Rhinotermitidae* species. *Journal of Chemical Ecology*, 21(11): 1837–1845.
- Weil T, Hoffmann K, Kroiss J, Strohm E, Korb J, 2009. Scent of a queen-cuticular hydrocarbons specific for female reproductives in lower termites. *Naturwissenschaften*, 96(2): 315–319.
- Yang JJ, Ji BZ, Liu SW, Zhang XW, Wang HJ, Soleymanninejadian E, Ding F, 2014. Optimization of solid phase microextraction conditions of cuticular hydrocarbons from *Odontotermes formosanus*. *Science Technology and Engineering*, 14(31): 19–24. [杨锦锦, 嵇保中, 刘曙雯, 张新慰, 汪洪江, Ehsan Soleymanninejadian, 丁芳, 2014. 黑翅土白蚁表皮碳氢化合物固相微萃取条件优化. *科学技术与工程*, 14(31): 19–24.]
- Zhang HB, Li XY, Dai HG, Zhong QJ, 2005. Analysis of cuticular hydrocarbons of termites and its application in taxonomy. *Acta Entomologica Sinica*, 48(4): 582–587. [张红兵, 李小鹰, 戴华国, 周秋君, 2005. 白蚁表皮碳氢化合物组分鉴定及分类学意义. *昆虫学报*, 48(4): 582–587.]