环境昆虫学报 2022，44（6）：1414－1425
Journal of Environmental Entomology
http：//hjkcxb. alljournals. net
doi：10. 3969/j. issn. 1674－0858. 2022. 06. 10



李群臣，石庆型，陈婷，陈洁，吕利华，齐国君. 表皮碳氢化合物在3种火蚁属蚂蚁成虫鉴定中的应用［J］. 环境昆虫学报，2022，44（6）：1414－1425.

表皮碳氢化合物在3种火蚁属蚂蚁成虫鉴定中的应用

李群臣[1,2]，石庆型[1]，陈　婷[1]，陈　洁[1]，吕利华[1]，齐国君[1*]
（1. 广东省农业科学院植物保护研究所/广东省植物保护新技术重点实验室，广州 510640；2. 华南农业大学植物保护学院，广州 510642）

摘要：红火蚁 *Solenopsis invicta* 是火蚁属重要的入侵蚂蚁，与其近缘种黑火蚁 *S. richteri* 和杂交蚁 *S. invicta* × *S. richteri* 形态相似，难以区分。为了快速准确鉴定3种火蚁属近缘种，本研究利用气相色谱－质谱联用仪（GC－MS），解析3种火蚁的工蚁、有翅雌蚁、有翅雄蚁的表皮碳氢化合物种类和含量，并进行主成分分析、判别分析及聚类分析。结果表明：3种火蚁共检测到62种表皮碳氢化合物，主要包括一甲基烷烃、二甲基烷烃和正构烷烃等；红火蚁、黑火蚁及杂交蚁不同品级的表皮碳氢化合物种类及含量存在显著的种间差异，红火蚁不同地理种群的表皮碳氢化合物种类及含量相似度较高；建立3种火蚁相应品级的分类判别函数，可准确区分各品级下的3种火蚁。因此，表皮碳氢化合物组成分析可用于红火蚁及其近缘种的分类鉴定，为口岸火蚁属蚂蚁的快速检疫鉴定提供新技术。

关键词：表皮碳氢化合物；火蚁；气相色谱－质谱联用仪
中图分类号：Q968.1；S433　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1674－0858（2022）06－1414－12

Identification of adult *Solenopsis invicta*, *S. richteri* and *S. invicta* × *S. richteri* by using cuticular hydrocarbons

LI Qun-Chen[1,2], SHI Qing-Xing[1], CHEN Ting[1], CHEN Jie[1], LYU Li-Hua[1], QI Guo-Jun[1*]
(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of High Technology for Plant Protection/Plant Protection Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. College of Plant Protection, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Red imported fire ant (RIFA), *Solenopsis invicta* is an important invasive fire ant species, which is similar to taxonomic character of black imported fire ant (BIFA), *S. richteri* and hybrid imported fire ant (HIFA), *S. invicta* × *S. richteri*. It is difficult to distinguish them by their appearance. In order to identify three closely related species of RIFA, BIFA and HIFA, the components and contents of cuticular hydrocarbons (CHCs) from worker, female and male winged forms of the three fire ants were analyzed by Gas Chromatography Mass Spectrometer (GC-MS), principal component analysis, discriminant analysis and cluster analysis. The result indicated that a total of 62 CHCs components were separated from the epidermis of the three species, including monomethyl alkanes, dimethyl alkanes and n-alkane. There were significant interspecific differences in the components and contents of CHCs among three castes of the three species of fire ants. While the CHCs components and

基金项目：国家重点研发计划（2021YFD1000500，2022YFC2601400）；国家自然科学基金（31801805）；广东省现代农业产业共性关键技术研发创新团队建设项目（2022KJ134）；2022年农业农村厅乡村振兴战略专项省级项目
作者简介：李群臣，男，1991年生，博士研究生，主要从事昆虫生态学研究，E－mail：1240153574@qq.com
* 通讯作者 Author for correspondence：齐国君，男，副研究员，主要从事昆虫生态学研究，E－mail：qigj@gdppri.com
收稿日期 Received：2022－08－22；接受日期 Accepted：2022－09－15

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

contents between two RIFA populations in Guangdong, China and Mississippi, USA were relatively similar. Cluster discriminant functions of different castes of the three species of fire ants were established by principal component analysis and discriminant analysis, which accurately distinguished workers, female and male winged forms of the three fire ants. Therefore, CHCs can be used for taxonomic identification of the three related species of RIFA, BIFA and HIFA. The result would provide a new technical tool for the port quarantine rapid detection and identification of some species of *Solenopsis*.

Key words: Cuticular hydrocarbons; fire ant; GC-MS

火蚁属 *Solenopsis* 是膜翅目 Hymenoptera 蚁科 Formicidae 中危害较大、入侵范围较广的一类蚂蚁，其中红火蚁 *Solenopsis invicta* Buren、热带火蚁 *S. geminata* (Fabricius) 已成为全球性的重要入侵蚂蚁 (Tschinkel, 2006; Ascunce *et al.*, 2011; Wetterer, 2011)，对农林业生产、人畜健康、公共安全及生态环境构成严重威胁 (Vinson, 1997; Jetter *et al.*, 2002; Bertelsmeier *et al.*, 2015)。近年来，随着国际贸易及人类活动的日益频繁，入侵蚂蚁在世界各国口岸截获及传播扩散的风险急剧增加 (Suarez *et al.*, 2001; Ward *et al.*, 2006; Bertelsmeier *et al.*, 2017)，加强口岸快速检测鉴定是防范外来入侵蚂蚁最为直接、有效的手段之一 (Yang *et al.*, 2019)。

红火蚁是全球公认的百种最危险的外来入侵物种之一 (Lowe *et al.*, 2000)，近缘种包括黑火蚁 *S. richteri* Forel、杂交蚁 *S. invicta* × *S. richteri*。黑火蚁大约 1918 年首次入侵阿拉巴马州莫比尔 (Creighton, 1930)，目前局限分布在密西西比州、阿拉巴马州及田纳西州部分区域 (Callcott and Collins, 1996)。红火蚁于 1930 年代入侵美国 (Buren *et al.*, 1974; Lofgren *et al.*, 1975)，迅速扩散至美国南部 19 州 (Callcott and Collins, 1996)，并入侵加勒比海地区 (Davis *et al.*, 2001)、澳大利亚 (Henshaw *et al.*, 2005)、新西兰 (Pascoe, 2002)、中国 (Chen *et al.*, 2005; 曾玲等, 2005)、日本 (Murakami, 2018)、韩国 (Lyu and Lee, 2017)，扩散蔓延形势依旧严峻 (Wetterer, 2013)。而杂交蚁最早于 1985 年在密西西比州发现 (Vander Meer *et al.*, 1985)，仅局限分布在阿拉巴马州、阿肯色州、乔治亚州、密西西比州和田纳西州 (Valles *et al.*, 2021)。

红火蚁、黑火蚁与杂交蚁的形态特征十分相似，难以准确快速区分识别。虽然 Trager (1991) 系统梳理了火蚁属蚂蚁的形态分类鉴定特征，并制定了检索表，但火蚁属种类通常很难利用卵、幼虫及蛹形态鉴定到种，形态学鉴定一般是基于工蚁的形态鉴别特征 (陈乃中等, 2005)，且只有少数分类专家才能准确鉴定。分子生物学技术为火蚁属蚂蚁的快速鉴定提供了新的手段，曾玲等 (2005) 利用聚合酶链反应－限制性片段长度多态性 (PCR-RFLP) 方法快速区分红火蚁和热带火蚁，陈岩等 (2011) 以 COI 基因片段为分子标记，建立了火蚁属部分种类的 DNA 条码鉴定系统，徐浪等 (2013) 利用实时荧光 PCR 鉴定了红火蚁、黑火蚁及热带火蚁，但由于 DNA 易降解而影响 PCR 扩增，从而无法有效解决火蚁属蚂蚁的分子鉴定难题。因此，在口岸检验检疫过程中，除了形态学及分子生物学鉴定外，亟需一种快速、准确的火蚁属蚂蚁鉴定技术。

昆虫表皮碳氢化合物 (cuticular hydrocarbons, CHCs) 稳定存在于昆虫的上表皮蜡质层中，主要由直链饱和烃、直链不饱和烃、支链饱和烃和支链不饱和烃构成 (Lockey, 1985, 1988)。昆虫表皮碳氢化合物的组分和含量具有一定的物种特异性 (Howard and Blomquist, 2005)，可以作为一类有效的分类特征 (Kather and Martin, 2012)，已被广泛应用于蜜蜂、白蚁、天牛、蓟马、实蝇、甲虫等多种昆虫的分类研究中 (Kaib *et al.*, 1991; 张红兵等, 2005; 林涛等, 2016; 王书平等, 2017; Chen *et al.*, 2020; 蒲宇辰等, 2020)，利用昆虫表皮碳氢化合物鉴定昆虫种类已成为当前昆虫分类学的研究热点之一 (Kather and Martin, 2012; 李群臣等, 2019)。与形态分类特征相比，表皮碳氢化合物作为一项生化特征，尤其适用于形态相似的近缘种和隐种的鉴定 (Kather and Martin, 2012; Chen *et al.*, 2020)。

红火蚁、黑火蚁与杂交蚁是近缘种，早期分类中存在混淆 (Buren, 1972)，Lok 等 (1975) 利用 EI-MS 初步分析了红火蚁、黑火蚁的表皮脂质，Nelson 等 (1980) 重新分析确定了二者表皮甲基烷烃的差异，Vander Meer and Lofgren (1988) 利

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

用3种火蚁表皮碳氢化合物及生物碱的差异进行了较为准确的分类鉴定，但尚未针对有翅雌蚁、有翅雄蚁开展深入研究，且基于几种特征化合物的种类鉴定仍存在一定的局限性。本研究以红火蚁、黑火蚁及杂交蚁为研究对象，利用气相色谱－质谱联用仪（GC-MS）对红火蚁广东种群和密西西比种群、黑火蚁、杂交蚁的工蚁、有翅雌蚁、有翅雄蚁的表皮碳氢化合物进行分析，明确3种火蚁属近缘种及不同红火蚁地理种群的表皮碳氢化合物组分差异，利用主成分分析和判别分析建立3种火蚁相应品级的分类判别函数，以期为建立口岸火蚁属蚂蚁的快速检疫鉴定技术提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

供试红火蚁广东种群采自广东省广州市白云区钟落潭镇国家农业科技园区（23.38° N，113.43°E），参照吕利华等（2006）方法进行田间蚁群采集、人工饲养，饲养室的条件为温度26 ± 2℃，相对湿度约75%，光周期12 L∶12 D，每2 d喂食10%蜂蜜水和20头黄粉虫。

供试红火蚁美国密西西比种群于2017年1月25日采自美国密西西比州华盛顿县霍兰黛尔路旁（33.15°N，90.91°W）。供试黑火蚁种群于2017年2月9日采自美国密西西比州德索托县蒂尼卡镇（34.82°N，90.22°W）。供试杂交蚁种群于2017年2月8日采自美国密西西比州格林纳达县霍尔科姆镇（33.78°N，89.87°W）。

1.2 试验仪器与试剂

仪器：气相色谱质谱联用仪 GC-MS 7890A-5975C（美国 Agilent 公司）；Combi PAL 自动进样器（瑞士 CTC 公司）；色谱柱为石英毛细管柱 HP-5MS（0.25 mm × 30 m × 0.25 μm）（美国 Agilent 公司）；150 μL 玻璃内衬管（美国 Agilent 公司）；100 μL 进样针（美国 Agilent 公司）；10 μL 进样针（美国 Agilent 公司）；电子天平（Sartorius，BSA224S））；2 mL 棕色色谱进样瓶（美国 Agilent 公司）；封口膜（美国 Parafilm 公司）。

试剂：99.8% 色谱纯正己烷（美国 Sigma 公司）；C7-C40 正构烷烃混合标样（美国 Sigma 公司）；正十六烷（美国 Sigma 公司）；纯度99.99%高纯氮气（广州市君多气体有限公司）。

1.3 表皮浸提物样品制备

将3种火蚁有翅雌蚁1头、有翅雄蚁1头、中型工蚁（0.595 mm < 头壳宽 ≤ 1.000 mm）（Porter and Tschinkel，1985）3头分别放在电子天平上称量。将称量好的样品置于2 mL 色谱进样瓶内，加入500 μL 色谱纯正己烷浸提8 min。将浸提液转移至另一2 mL 进样瓶中，用高纯氮气在通风橱内浓缩至约100 μL，将浓缩后的浸提液转移至内衬管中，再用高纯氮气完全吹干，并用100 μL 进样针加入20 μL 正己烷重新溶解，用10 μL 进样针加入2 μL 正十六烷（40 ng/μL）作为内标。为了防止样品蒸发，样品瓶用封口膜进行密封并立即分析。采用自动进样法进样2 μL。每处理重复7次。

1.4 仪器分析条件

GC-MS 升温条件如下：起始温度50℃，以25℃/min 升至250℃，最后以2℃/min 升至290℃，保留5 min，整个程序共33 min。载气为高纯氦气，流速为1 mL/min，柱头压为7.652 psi。电子轰击离子源（EI），电子能量为70 eV，离子源温度为230℃，四极杆温度为150℃。进样口温度为290℃，不分流模式。GC 与 MS 连接口温度为290℃，溶剂延迟4.5 min。

1.5 数据分析

1.5.1 表皮碳氢化合物的定性分析

进样2 μL 正构烷烃 C7-C40 混合标准品及表皮浸提物，获得供试样品表皮碳氢化合物的总质谱图和各组分的出峰保留时间，参照林涛等（2016）方法，以正构烷烃保留时间为标准，计算供试样品所含表皮碳氢化合物的科瓦茨保留指数（Kovǎts index，KI）。将获得的表皮碳氢化合物质谱图，在 NIST11 数据库中检索，并将保留指数、特征离子峰和质荷比等参数信息与已有文献所提供的 KI 指数进行比对（Eliyahu *et al.*，2011），从而确定3种火蚁表皮碳氢化合物的种类及结构。

1.5.2 表皮碳氢化合物的定量分析

将获得的色谱总离子流程图进行表皮碳氢化合物特征离子 M/Z = 57.0 提取，然后以初始峰宽、初始阈值分别为0.020、13.5 对各色谱峰进行积分获得各色谱峰的峰面积。采用峰面积归一化法，将各表皮碳氢化合物的峰面积之和看作1，每种表皮碳氢化合物对应的峰面积与峰面积之和的比值作为该表皮碳氢化合物的相对含量。参照林涛等（2016）方法，对各组分峰面积进行 log 数据转化，同时以内标正十六烷的峰面积计算各组分质量，

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

进而计算虫体单位重量的表皮碳氢化合物组分含量。

1.5.3　表皮碳氢化合物组成比较及判别分析

以转换后的各组分转换峰面积为变量进行主成分分析（Principle Component Analysis，PCA），从多个组分含量数据中选择少数几个综合变量，实现多变量的降维。以统计中最小特征值大于 1 的特征变量作为提取后的主成分，并获得因子得分（Factor score）数据，将各主成分的因子得分分组后，进行逐步判别分析（Discriminant Analysis，DA），利用判别函数来指导分类，利用典型得分散点图直观显示样品分类情况，将样品中各组分相对含量的数据进行 Q 型聚类分析（Cluster Analysis，CA）来确定近缘种之间的相似性或亲疏关系（林涛等，2016；雷妍圆等，2017）。

利用 SPSS 16.0 对不同烷烃相对含量进行单因素方差分析（one-way ANOVA），采用 Tukey 法进行多重比较检验，利用 Statistics 10.0 对数据进行主成分分析和逐步判别分析，利用 GPS（Group-based Prediction System）HemI 软件对各组分峰面积经 log 转换后的数据进行聚类分析。

2　结果与分析

2.1　3 种火蚁表皮碳氢化合物组成分析

利用 GC-MS 分析获得了 3 种火蚁工蚁、有翅雌蚁、有翅雄蚁的表皮碳氢化合物色谱图，并对色谱图组成进行 M/Z = 57.0 提取和色谱峰积分，获得样品表皮碳氢化合物的组分及绝对含量。结果表明，3 种火蚁提取物中共检测到 62 种表皮碳氢化合物，其中红火蚁广东种群与密西西比种群、黑火蚁、杂交蚁分别含 46、42、41 和 40 种（图 1），此外，3 种火蚁表皮碳氢化合物的出峰时间明显不同，红火蚁集中出现于 4 ~ 19 min，黑火蚁集中于 10 ~ 17 min，杂交蚁集中于 11 ~ 18 min（图 1）。

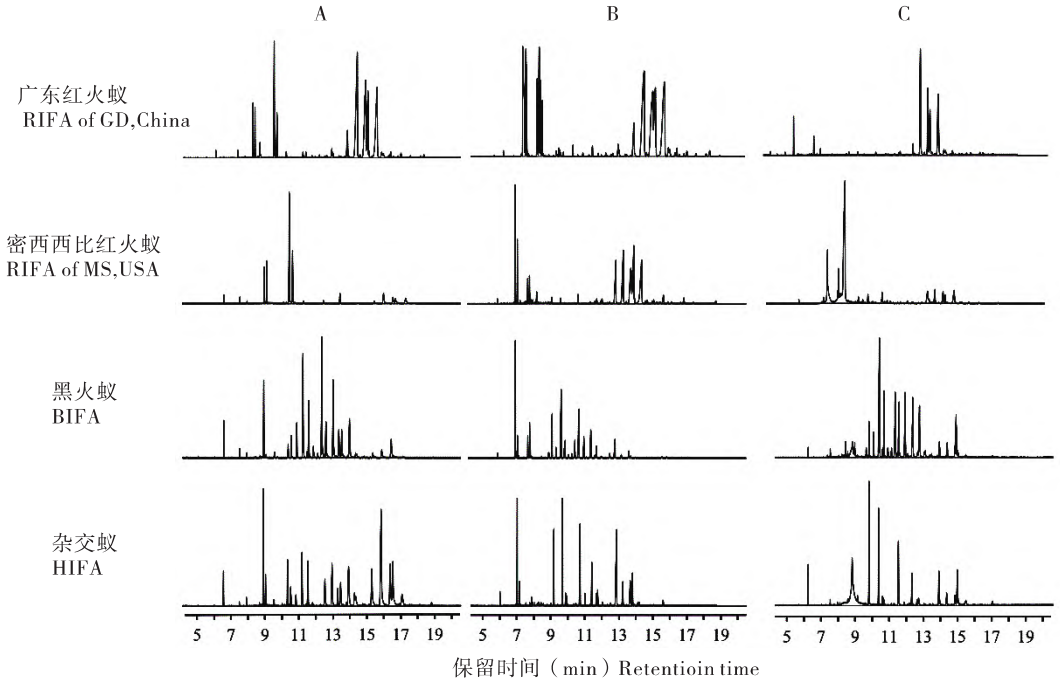


图 1　3 种火蚁工蚁（A）、有翅雌蚁（B）和有翅雄蚁（C）的表皮碳氢化合物总离子流程图

Fig. 1　Total ion chromatograms of cuticular hydrocarbons of worker (A), female winged form (B) and male winged form (C) from three species of fire ants

3 种火蚁工蚁、有翅雌蚁和有翅雄蚁的表皮碳氢化合物中烷烃种类皆包含正构烷烃、一甲基烷烃和二甲基烷烃等，其中一甲基烷烃种类在所有碳氢化合物中的占比最高，为 43.42% ~ 67.27%，正构烷烃占 8.23% ~ 47.47%，二甲基烷烃占 5.14% ~ 43.12%（表 1），在不同种和品级之间表皮碳氢化合物的种类存在差异，除红火蚁密西西比种群和黑火蚁的有翅雌蚁中一甲基烷烃含量与正构烷烃无显著差异（$F = 0.065$，df = 18，$P = 0.802$；$F = 0.046$，df = 16，$P = 0.834$），其余红

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

火蚁广东种群与密西西比种群、黑火蚁、杂交蚁的不同品级的一甲基烷烃含量均显著高于正构烷烃、二甲基烷烃（表 1），说明一甲基烷烃是 3 种火蚁的表皮碳氢化合物中的主要烷烃种类。

表 1　3 种火蚁工蚁、有翅雌蚁和有翅雄蚁烷烃类化合物组成及相对含量

Table 1　Components and relative content of alkanes compounds from workers, female winged form and male winged form three species of fire ants

品级 Castes	种类或种群 Species or population	正构烷烃 n-alkane		一甲基烷烃 Monomethyl alkanes		二甲基烷烃 Dimethyl alkanes	
		种类 Components	相对含量（%） Relative content	种类 Components	相对含量（%） Relative content	种类 Components	相对含量（%） Relative content
工蚁 Worker	广东红火蚁种群 GD RIFA population	4	8.23 ± 0.93 Dc	11	48.66 ± 1.30 Ba	13	43.12 ± 0.47 Ab
	密西西比红火蚁种群 MS RIFA population	5	12.50 ± 1.54 Cc	6	46.14 ± 1.64 Ca	5	42.36 ± 1.09 Ab
	黑火蚁 BIFA	6	25.44 ± 1.94 Ab	12	67.27 ± 4.12 Aa	4	7.23 ± 4.18 Cc
	杂火蚁 HIFA	8	21.36 ± 1.99 Bb	12	66.28 ± 1.37 Aa	2	12.36 ± 0.73 Bc
有翅雌蚁 Female winged form	广东红火蚁种群 GD RIFA population	7	30.84 ± 1.74 Cb	13	63.88 ± 1.85 Aa	9	5.27 ± 0.43 Bc
	密西西比红火蚁种群 MS RIFA population	7	47.47 ± 8.50 Aa	13	46.39 ± 9.40 Ba	10	6.14 ± 1.00 Bb
	黑火蚁 BIFA	5	43.82 ± 4.55 Aa	15	43.42 ± 2.74 Ba	8	12.75 ± 2.10 Ab
	杂火蚁 HIFA	5	38.45 ± 5.01 Bb	14	49.72 ± 4.54 Ba	9	11.83 ± 2.14 Ac
有翅雄蚁 Male winged form	广东红火蚁种群 GD RIFA population	5	23.25 ± 0.78 Cc	8	45.82 ± 1.44 Ba	7	30.93 ± 2.10 Ab
	密西西比红火蚁种群 MS RIFA population	5	34.35 ± 0.72 Bb	11	44.78 ± 0.94 Ba	7	20.87 ± 0.82 Bc
	黑火蚁 BIFA	7	23.86 ± 6.59 Cb	17	57.26 ± 3.74 Aa	6	18.88 ± 3.92 Bb
	杂火蚁 HIFA	9	39.53 ± 2.48 Ab	8	55.32 ± 2.00 Aa	4	5.14 ± 0.59 Cc

注：表中含量数据为平均数 ± 标准误。含量中，同一品级内同列不同大写字母表示在 0.05 水平上显著差异；同行不同小写英文字母表示在 0.05 水平上显著差异。Note: Data in the table of content presented as Mean ± SE. And the data in same column of content followed by different capital letters were significantly different at the 0.05 level ($P < 0.05$); the data in same row of content followed by different lowercase letters were significantly different at the 0.05 level ($P < 0.05$).

2.2　3 种火蚁表皮碳氢化合物比较及判别分析

针对工蚁的表皮碳氢化合物聚类分析结果表明，红火蚁广东种群与密西西比种群工蚁首先归为一类，其次两者与黑火蚁归为一类，再次三者与杂交蚁归为一类，3 种火蚁工蚁表皮碳氢化合物的种内相似度高于种间（图 2-A）。主成分分析得出 3 种火蚁工蚁的表皮碳氢化合物 4 个主成分，即 PC1、PC2、PC3 和 PC4，分别解释原始变量方差的 58.75%、25.81%、11.33% 和 2.47%，累计解释原始变量总方差的 98.36%。逐步判别分析结果表明，3 种火蚁工蚁的表皮碳氢化合物成分存在显著差异（Wilks$\lambda = 0$，$F = 7955.85$，$P < 0.001$），所有供试个体均可被正确分类，逐步判别得到 3 个特征根，其中根 1、根 2 的解析变异率分别为 81.40%、15.63%，累计解析变异率达到 97.03%，通过根 1 可以将红火蚁工蚁广东种群与红火蚁工蚁密西西比种群、黑火蚁工蚁、杂交蚁工蚁明显区分，通过根 2 可以将红火蚁工蚁密西西比种群、黑火蚁工蚁、杂交蚁工蚁明显区分（图 3-A）。因此，根 1 和根 2 可解释 3 种火蚁工蚁

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

之间表皮碳氢化合物色谱图的差异，应用交互验证对每种火蚁的工蚁进行回判，判别准确率为 100%，利用表皮碳氢化合物可准确区分 3 种火蚁工蚁。

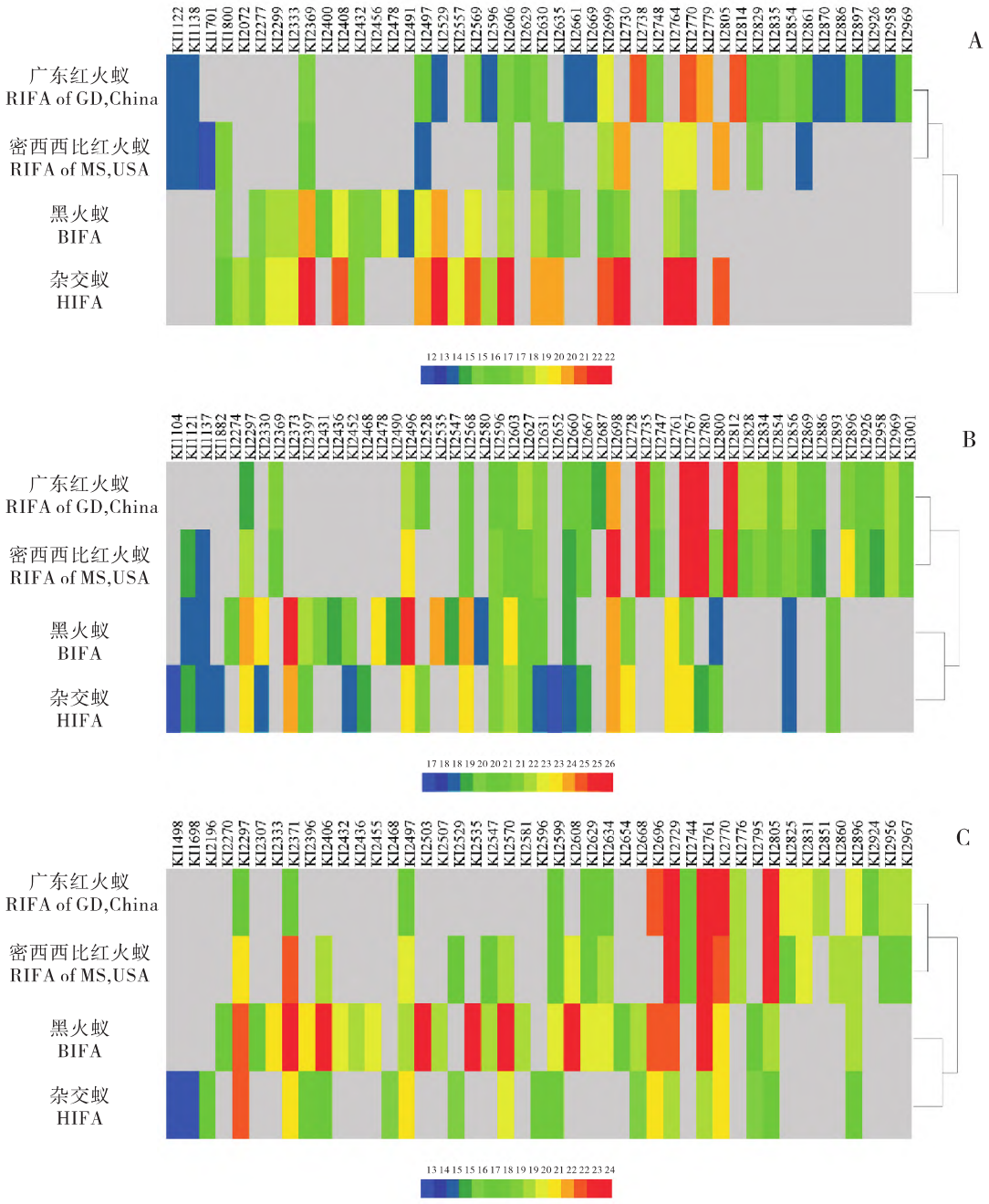


图 2　3 种火蚁工蚁（A）、有翅雌蚁（B）和有翅雄蚁（C）表皮碳氢化合物热图

Fig. 2　Heat map of cuticular hydrocarbons from workers (A), female winged form (B) and male winged form (C) of the three species of fire ants

针对有翅雌蚁的表皮碳氢化合物聚类分析分析结果表明，红火蚁广东种群与密西西比种群有翅雌蚁首先归为一类，黑火蚁与杂交蚁有翅雌蚁归为一类，3 种火蚁有翅雌蚁表皮碳氢化合物的种内相似度高于种间（图 2-B）。主成分分析得出 3 种火蚁有翅雌蚁的表皮碳氢化合物 3 个主成分，即 PC1、PC2 和 PC3，分别解释原始变量方差的 57.96%、24.90% 和 12.81%，共可解释原始变量方差的 97.67%。逐步判别分析结果表明，3 种火蚁有翅雌蚁的表皮碳氢化合物成分存在显著差异（Wilks′λ = 0.0000005，F = 3606.29，P < 0.001），所有供试个体均可被正确分类，逐步判别得到

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3 个特征根，其中根 1、根 2 的解析变异率分别为 70.51%、28.50%，累计解析变异率达到 99.01%，通过根 1 可以将红火蚁与黑火蚁、杂交蚁明显区分，通过根 2 可以将红火蚁有翅雌蚁广东种群与密西西比种群明显区分，将黑火蚁与杂交蚁明显区分（图 3-B）。因此，根 1、根 2 可解释 3 种火蚁有翅雌蚁之间表皮碳氢化合物色谱图的差异，交互验证对每种火蚁的雌蚁回判，判别正确率为 100%，利用表皮碳氢化合物可准确区分 3 种火蚁有翅雌蚁。

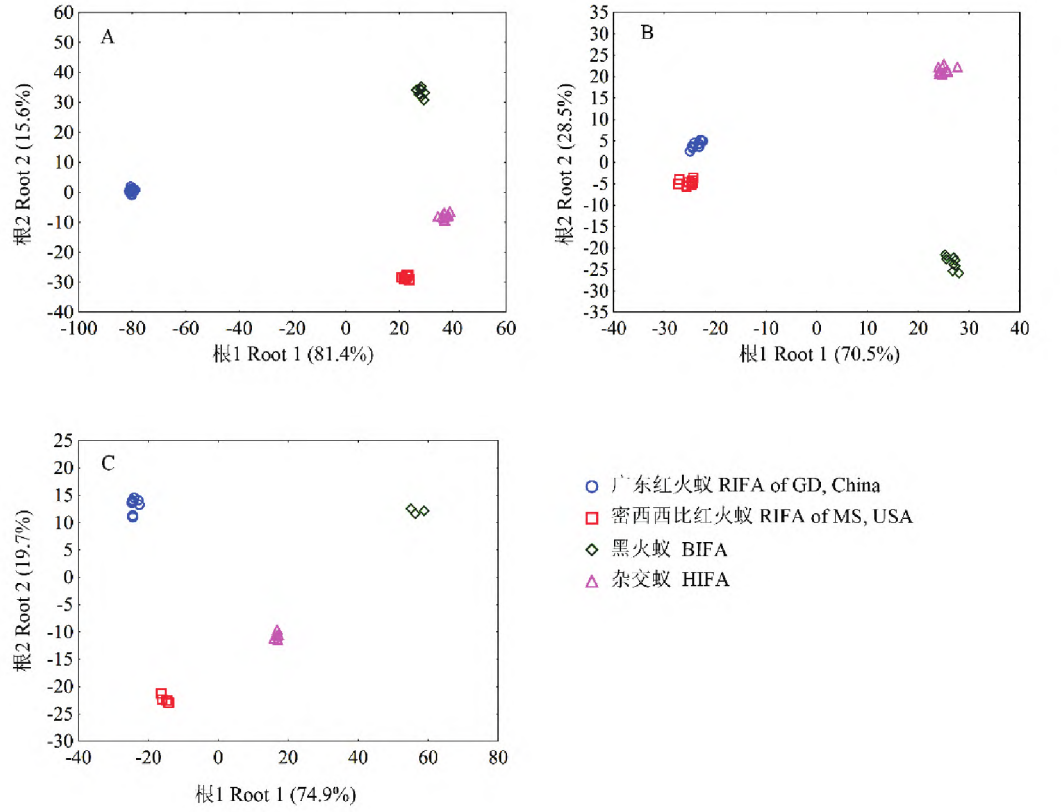


图 3　3 种火蚁工蚁（A）、有翅雌蚁（B）和有翅雄蚁（C）表皮碳氢化合物的判别分析特征根散点图

Fig. 3　Characteristic root scatter plots discriminant analysis of cuticular hydrocarbons from workers (A), female winged form (B) and male winged form (C) of the three species of fire ants

针对有翅雄蚁的表皮碳氢化合物聚类分析分析结果表明，红火蚁广东种群与密西西比种群有翅雄蚁首先归为一类，黑火蚁与杂交蚁有翅雄蚁归为一类，3 种火蚁有翅雄蚁表皮碳氢化合物的种内相似度高于种间（图 2-C）。主成分分析得出 3 种火蚁有翅雄蚁的表皮碳氢化合物 3 个主成分，即 PC1、PC2 和 PC3，分别解释原始变量方差的 51.35%、35.93% 和 9.06%，共解释原始变量方差的 96.34%。逐步判别分析结果表明，3 种火蚁有翅雄蚁的表皮碳氢化合物存在显著差异（Wilks′λ = 0，F = 3920.23，P < 0.001），逐步判别获得 3 个特征根，其中根 1、根 2 的解释变异率分别为 74.90%、19.74%，累计变异率达到 94.64%，通过根 1 可以将红火蚁与黑火蚁、杂交蚁明显区分，通过根 2 可以将红火蚁广东种群与密西西比种群明显区分（图 3-C）。因此，根 1、根 2 可解释 3 种火蚁有翅雄蚁之间表皮碳氢化合物色谱图的差异，交互验证对每种火蚁雄蚁回判，判别正确率为 100%，利用表皮碳氢化合物可准确区分 3 种火蚁有翅雄蚁。

比较分析 3 种火蚁种间及红火蚁地理种群间的表皮碳氢化合物组成，红火蚁、黑火蚁、杂交蚁的表皮碳氢化合物存在明显的种间差异，红火蚁不同地理种群的表皮碳氢化合物种类极为相似，仅是含量有所差异，而且小于火蚁间的种间差异。通过判别函数分析建立起 3 种火蚁相应品级的分类判别函数（表 2），在做判别分析时，将同一品级下 3 种火蚁的表皮碳氢化合物组成代入分类判别函数公式，函数值最高者即为待检火蚁种类。因此，可利用表皮皮碳氢化合物进行红火蚁、黑火蚁及杂交蚁等近缘种的分类鉴定。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 2　3 种火蚁的分类判别函数

Table 2　Classification discriminant functions of three species of fire ants

品级 Castes	种类或种群 Species or population	主成分 Principal components				常数 Constant
		PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	
工蚁 Worker	广东红火蚁种群 GD RIFA population	−3 770.48	−1 318.17	111.34	110.30	−3 223.82
	密西西比红火蚁种群 MS RIFA population	856.68	958.37	2.73	−57.05	−729.29
	黑火蚁 BIFA	1 554.97	−218.78	101.26	7.49	−968.16
	杂火蚁 HIFA	1 685.67	748.38	−204.65	−71.402	−806.72
有翅雌蚁 Female winged form	广东红火蚁种群 GD RIFA population	−599.43	−11.95	−85.57	—	−297.74
	密西西比红火蚁种群 MS RIFA population	−617.26	114.97	−169.69	—	−341.74
	黑火蚁 BIFA	716.41	298.97	4.86	—	−628.48
	杂火蚁 HIFA	571.92	−372.10	250.88	—	−546.93
有翅雄蚁 Male winged form	广东红火蚁种群 GD RIFA population	−726.42	−135.22	20.51	—	−377.55
	密西西比红火蚁种群 MS RIFA population	−412.25	358.76	168.26	—	−410.71
	黑火蚁 BIFA	1623.90	−230.26	−408.15	—	−1718.61
	杂火蚁 HIFA	517.73	67.50	77.47	—	−261.51

注：“—”代表无主成分数据。Note: “—” represented no data of principal components.

3　结论与讨论

早期分类中红火蚁与黑火蚁被误认为是 *Solenopsiss aevissima* 的变种（Buren，1972），后来研究表明红火蚁与黑火蚁的表皮碳氢化合物包括一系列正构烷烃、一甲基烷烃和二甲基烷烃，二者成分具有种的特异性（Lok *et al.*，1975；Nelson *et al.*，1980），并研发了基于表皮碳氢化合物的计算机识别算法来区分（Brill *et al.*，1985a，1985b），Vander Meer 等（1985）首次发现红火蚁与黑火蚁杂交的生化证据，之后利用表皮碳氢化合物及毒液生物碱的差异对 3 种火蚁进行分类鉴定（Ross *et al.*，1987，Vander Meer and Lofgren，1988）。本研究明确了 3 种火蚁不同品级成虫的表皮碳氢化合物种类及含量存在明显种间差异，利用各品级的分类判别函数可准确区分 3 种火蚁种类及不同品级，可见，表皮碳氢化合物可应用于红火蚁、黑火蚁及杂交蚁等近缘种的分类鉴定。

昆虫合成表皮碳氢化合物的原料来源有两种途径，一种是通过自身绛色细胞吸收 CO_2 合成，一种是从摄取的食物获得（Howard and Blomquist，2005）。昆虫表皮碳氢化合物的种类及含量与昆虫的发育阶段、性别、社会性昆虫的多态性以及地理分布、寄主、分析方法和保存时间等多种因素相关（Kather and Martin，2012；李群臣等，2019）。一般而言，地理分布会影响表皮碳氢化合物的含量，但不会改变表皮碳氢化合物的组成和种类（Kather and Martin，2012）。张红兵等（2005）研究了我国圆唇凸额类、圆唇平额类、尖唇类 3 个类群 8 种白蚁 11 个地理种群的表皮碳氢化合物，明确了不同白蚁种类的表皮碳氢化合物组成和含量均有差异，而不同地理种群的表皮碳氢化合物组成具有相对稳定性。Perdereau 等

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

(2010) 研究了入侵地 (法国) 和原产地 (美国) 之间的 9 个白蚁 *Reticulitermes flavipes* 地理种群的表皮碳氢化合物，入侵地白蚁种群与路易斯安那州的表皮碳氢化合物具有高度的一致性，但与佛罗里达州白蚁种群有差异。Vaníčková 等 (2015) 分析明确了秘鲁、阿根廷和巴西 6 个南美按实蝇 *Anastrepha fraterculus* 地理种群的表皮碳氢化合物种类趋于一致，仅是含量存在差异，除阿根廷土库曼种群与巴西南部种群、哥伦比亚种群与墨西哥种群表皮碳氢化合物相同，其他地区之间存在比较明显的差异，可见，不同地理种群的昆虫，其表皮碳氢化合物会存在一定的差异。本研究对比分析了红火蚁广东种群和密西西比种群不同品级的表皮碳氢化合物种类和含量，结果发现红火蚁有翅雌蚁和有翅雄蚁的表皮碳氢化合物种类及含量相似度较高，具有相对稳定的组分和种的特异性，而工蚁品级存在较大差异，广东种群含有 30 种表皮碳氢化合物，密西西比种群仅含 16 种，引起这种差异的原因可能与其地理分布和生境有关，两地生境的不同导致红火蚁种群的表皮碳氢化合物发生变化。

社会性昆虫中，不同分工及不同等级昆虫的表皮碳氢化合物也存在一定的差异 (Howardand Blomquist, 2005)。研究表明，执行不同任务的收获蚁 *Pogonomyrmex barbatus* 工蚁的碳氢化合物组成成分不同，在巢外较长时间的觅食蚁的烷烃比例比与巢内育幼蚁高 (Wagner *et al.*, 2001)。Kather 等 (2011) 也发现执行不同任务的意大利蜜蜂 *Apis mellifera* 表皮碳氢化合物存在差异，具有特殊任务的工蜂含有正构烷烃和烯烃，而在脂肪酸谱中未发现特定任务的特征。类似的发现也存在于印度蜂 *A. cerana*，新生蜂、育幼蜂、觅食蜂的表皮碳氢化合物也存在显著差异，觅食蜂的烷烃含量明显更高 (Rahman *et al.*, 2016)。社会性昆虫胡蜂 *Polistes dominulus* 表皮碳氢化合物中的烷烃和单甲基烷烃被用于区分工蜂和蜂后等不同等级 (Dapporto *et al.*, 2001)。杨锦锦等 (2015) 研究明确了黑翅土白蚁 *Odontotermes formosanus* 的表皮碳氢化合物具有品级特征，即工蚁、兵蚁、幼蚁和生殖蚁含有表皮碳氢化合物种类相同，组分含量存在差异。本研究明确了 3 种火蚁种内不同品级之间表皮碳氢化合物种类与含量均存在一定差异，可能与火蚁属蚂蚁种内不同品级的分工有关。

研究表明，社会性昆虫的表皮碳氢化合物是一类复杂的化学信号，在同伴识别、亲缘关系识别、任务分工及物种识别方面发挥重要作用 (Liu *et al.*, 2000; Menzel *et al.*, 2009)，甚至可以影响地理分布格局 (Xu *et al.*, 2018)。蚂蚁的表皮碳氢化合物是由基因决定的，可能受到饮食或建巢材料等外界因素的影响 (Heinze *et al.*, 1996; Sorvari *et al.*, 2008)，也通过身体接触、梳理、交哺等方式存留在蚁群成员 (Richard and Hunt, 2013; Walsh *et al.*, 2020)。本研究通过 3 种火蚁不同品级表皮碳氢化合物的种类含量，建立 3 种火蚁不同品级的分类判别函数，可快速准确区分红火蚁、黑火蚁及杂交蚁等近缘种，而针对 3 种火蚁表皮碳氢化合物的结构及功能还需进一步研究。

致谢：美国红火蚁、黑火蚁及杂交蚁样品由美国农业部农业研究中心陈健博士提供，特此致谢。

参考文献 (References)

Ascunce MS, Yang CC, Oakey J, *et al.* Global invasion history of the fire ant *Solenopsis invicta* [J]. *Science*, 2011, 331 (6020): 1066 – 1068.

Bertelsmeier C, Luque GM, Hoffmann BD, *et al.* Worldwide ant invasions under climate change [J]. *Biodiversity and Conservation*, 2015, 24: 117 – 128.

Bertelsmeier C, Ollier S, Liebhold A, *et al.* Recent human history governs global ant invasion dynamics [J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2017, 1: 0184.

Brill JH, Mar T, Mayfield HT, *et al.* Use of computerized pattern recognition in the study of the cuticular hydrocarbons of imported fire ants. II. Comparison of the cuticular hydrocarbon patterns between different colonies of *Solenopsis richteri* [J]. *Journal of Chromatography A*, 1985b, 349 (1): 39 – 48.

Brill JH, Mayfield HT, Mar T, *et al.* Use of computerized pattern recognition in the study of the cuticular hydrocarbons of imported fire ants. I. Introduction and characterization of the cuticular hydrocarbon patterns of *Solenopsis invicta* and *S. richteri* [J]. *Journal of Chromatography A*, 1985a, 349 (1): 31 – 38.

Buren WF, Allen GE, Whitcomb WH, *et al.* Zoogeography of the imported fire ants [J]. *Journal of the New York Entomological Society*, 1974, 82 (2): 113 – 124.

Buren WF. Revisionary studies on the taxonomy of the imported fire ants [J]. *Journal of the Georgia Entomological Society*, 1972, 7 (1): 1 – 26.

Callcott AMA, Collins HL. Invasion and range expansion of imported fire ants (Hymenoptera: Formicidae) in North America from 1918 – 1995 [J]. *Florida Entomologist*, 1996, 79 (2): 240 – 251.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Carlson DA, Service MW. Identification of mosquitoes of *Anopheles gambiae* species complex A and B by analysis of cuticular components [J]. *Science*, 1980, 207 (4435): 1089 – 1091.

Chen NZ, Shi ZW, Ma XG. Identification of red imported fire ant and important related species [J]. *Chinese Bulletion of Entomology*, 2005, 42 (3): 34 – 345. [陈乃中, 施宗伟, 马晓光. 红火蚁及其重要近似种的鉴别 [J]. 昆虫知识, 2005, 42 (3): 341 – 345]

Chen T, Li QC, Qi GJ, *et al.* Cuticular hydrocarbon pattern as a chemotaxonomy marker to assess six species of thrips [J]. *Journal of Asia – Pacific Entomology*, 2020, 23 (4): 1255 – 1263.

Chen Y, Zhang QE, Song MS. Molecular identification of the genus of *Solenopsis* through DNA barcodes [J]. *Plant Quarantine*, 2011, 25 (5): 8 – 11. [陈岩, 张秋娥, 宋曼殳. 火蚁属部分种类 DNA 条码技术研究初探 [J]. 植物检疫, 2011, 25 (5): 8 – 11]

Chen YF, Chang HC, Chao CM. Fire ant, a new hazard to military camps in Taiwan [J]. *Journal of Medical Sciences*, 2005, 25 (3): 161 – 165.

Creighton WS. The new world species of the genus *Solenopsis* (Hymenoptera: Formicidae) [J]. *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences*, 1930, 66 (2): 39 – 151.

Davis LR, Meer RKV, Porter SD. Red imported fire ants expand their range across the West Indies [J]. *Florida Entomologist*, 2001, 84 (4): 735 – 736.

DeFauw SL, Rojas MG, Morales – Ramos JA, *et al.* Extracted venom and cuticular compounds of imported fire ants, *Solenopsis* spp., and chemotaxonomic applications across a persistent hybrid zone [J]. *Journal of Entomological Science*, 2010, 45 (4): 335 – 352.

Eliyahu D, Ross KG, Haight KL. Venom alkaloid and cuticular hydrocarbon profiles are associated with social organization, queen fertility status, and queen genotype in the fire ant *Solenopsis invicta* [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2011, 37 (11): 1242 – 1254.

Gao M. Application of cuticular hydrocarbon analysis to insect taxonomy [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2001, 44 (1): 119 – 122. [高明媛. 昆虫表皮中碳氢化合物在昆虫分类中的应用 [J]. 昆虫学报, 2001, 44 (1): 119 – 122]

Gao MY, Wang XL, Li CJ. Identification of *Helicoverpa armigera* and *H. assulta* larvae (Lepidoptera: Noctuidae) by cuticular hydrocarbon analysis [J]. *Chinese Bulletin of Entomology*, 1999, 36 (5): 266 – 269. [高明媛, 王心丽, 李重九. 表皮碳氢化合物分析用于棉铃虫与烟青虫幼虫分类鉴别 [J]. 昆虫知识, 1999, 36 (5): 266 – 269]

Heinze J, Foitzik S, Hippert A, *et al.* Apparent dear – enemy phenomenon and environment – based recognition cues in the ant *Leptothorax nylanderi* [J]. *Ethology*, 1996, 102 (3): 510 – 522.

Henshaw MT, Kunzmann N, Vanderwoude C, *et al.* Population genetics and history of the introduced fire ant, *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: Formicidae), in Australia [J]. *Australian Journal of Entomology*, 2005, 44 (1): 37 – 44.

Howard RW, Blomquist GJ. Ecological, behavioral, and biochemical aspects of insect hydrocarbons [J]. *Annual Review of Entomology*, 2005, 50: 371 – 393.

Jetter KM, Hamilton J, Klotz JH. Eradication costs calculated: Red imported fire ants threaten agriculture, wildlife and homes [J]. *California Agriculture*, 2002, 56 (1): 26 – 34.

Kaib M, Brandl R, Bagine RKN. Cuticular hydrocarbon profiles: A valuable tool in termite taxonomy [J]. *Naturwissenschaften*, 1991, 78 (4): 176 – 179.

Kather R, Drijfhout FP, Martin SJ. Task group differences in cuticular lipids in the honey bee *Apis mellifera* [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2011, 37 (2): 205 – 212.

Kather R, Martin SJ. Cuticular hydrocarbon profiles as a taxonomic tool: Advantages, limitations and technical aspects [J]. *Physiological Entomology*, 2012, 37 (1): 25 – 32.

Lei YY, Lin T, He LY, *et al.* Influences of food factors on cuticular hydrocarbons of *Bactrocera dorsalis* adults [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2017, 39 (4): 805 – 812. [雷妍圆, 林涛, 何丽云, 等. 食物因素对桔小实蝇表皮碳氢化合物的影响 [J]. 环境昆虫学报, 2017, 39 (4): 805 – 812]

Li QC, Shi QX, Lei YY, *et al.* Advances on research and techniques for insect cuticular hydrocarbons analysis and their practice in chemical taxonomy in China [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2019, 41 (1): 62 – 69. [李群臣, 石庆型, 雷妍圆, 等. 中国昆虫表皮碳氢化合物与昆虫化学分类学的研究进展 [J]. 环境昆虫学报, 2019, 41 (1): 62 – 69]

Lin T, Chen T, He YR, *et al.* A solid injection technique suitable for cuticular hydrocarbon analysis of *Bactrocera dorsalis* (Diptera: Tephritidae) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2016, 59 (3): 278 – 291. [林涛, 陈婷, 何余容, 等. 一种可用于桔小实蝇表皮碳氢化合物分析的固体进样技术 [J]. 昆虫学报, 2016, 59 (3): 278 – 291]

Liu ZB, Yamane S, Tsuji K, *et al.* Nestmate recognition and kin recognition in ants [J]. *Insect Science*, 2000, 7 (1): 71 – 96.

Lockey KH. Insect cuticular lipids [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Comparative Biochemistry*, 1985, 81 (2): 263 – 273.

Lockey KH. Lipids of the insect cuticle-origin, composition and function [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology B: Biochemistry and Molecular Biology*, 1988, 89 (4): 595 – 645.

Lofgren CS, Banks WA, Glancey BM. Biology and control of imported fire ants [J]. *Annual Review of Entomology*, 1975, 20: 1 – 30.

Lok JB, Cupp EW, Blomquist GJ. Cuticular lipids of the imported fire ants, *Solenopsis invicta* and *S. richteri* [J]. *Insect Biochemistry*, 1975, 5 (6): 821 – 829.

Lowe SM, Browne M, Boudjelas S, *et al.* 100 of the world's worst invasive alien species: A selection from the global invasive species database. The Invasive Species Specialist Group (ISSG) a specialist group of the Species Survival Commission (SSC) of the International Union for Conservation of Nature (IUCN) [J]. *Environmental Science*, 2000: 1 – 12.

Lucas C, Fresneau D, Kolmer K. A multidisciplinary approach to discriminating different taxa in the species complex *Pachycondyla villosa* (Formicidae) [J]. *Biological Journal of the Linnean*

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Society, 2002, 75 (2): 249 – 259.

Lv LH, Feng X, Chen HY, *et al.* A technique for field collecting and laboratory rearing red imported fire ant, *Solenopsis invicta* [J]. *Chinese Bulletin of Entomology*, 2006, 43 (2): 265 – 267. [吕利华, 冯夏, 陈焕瑜, 等. 介绍红火蚁的野外采集和实验室饲养的方法 [J]. 昆虫知识, 2006, 43 (2): 265 – 267]

Lyu DP, Lee HS. The red imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: Formicidae: Myrmicinae) discovered in Busan sea port, Korea [J]. *Korean Journal of Applied Entomology*, 2017, 56 (4): 437 – 438.

Martin SJ, Helanterä H, Drijfhout FP. Evolution of species – specific cuticular hydrocarbon patterns in Fomica ants [J]. *Biological Journal of the Linnean Society*, 2008, 95 (1): 131 – 140.

Menzel F, Schmitt T, Blüthgen N. Intraspecific nestmate recognition in two parabiotic ant species: Acquired recognition cues and low inter-colony discrimination [J]. *Insectes Sociaux*, 2009, 56 (3): 251 – 260.

Murakami T. Three case studies for control of invasive alien ant species, fire ant (*Solenopsis invicta*, Formicidae) in Japan [J]. *Ketsudan Kagaku*, 2018, 4: 33 – 42.

Nelson DR, Fatland CL, Howard RW, *et al.* Re – analysis of the cuticular methylalkanes of *Solenopsis invicta* and *S. richteri* [J]. *Insect Biochemistry*, 1980, 10 (4): 409 – 418.

Pascoe A. Strategies for managing incursions of exotic animals to New Zealand [J]. *Micronesia*, 2002, 6: 129 – 135.

Perdereau E, Dedeine J, Christidès P, *et al.* Variations in worker cuticular hydrocarbons and soldier isoprenoid defensive secretions within and among introduced and native populations of the subterranean termite, *Reticulitermes flavipes* [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2010, 36 (11): 1189 – 1198.

Porter SD, Tschinkel WR. Fire ant polymorphism: The ergonomics of brood production [J]. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 1985, 16 (4): 323 – 336.

Pu YC, Xiang HJ, Huang B, *et al.* Categories and dynamics of cuticular hydrocarbons in *Octodonta nipae* adults with different ages and sexes [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2020, 42 (4): 838 – 846. [蒲宇辰, 向海军, 黄斌, 等. 水椰八角铁甲不同日龄和性别成虫表皮碳氢化合物的种类及动态 [J]. 环境昆虫学报, 2020, 42 (4): 838 – 846]

Rahman S, Hajong SR, Gévar J, *et al.* Cuticular hydrocarbon compounds in worker castes and their role in nestmate recognition in *Apis cerana indica* [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2016, 42 (5): 444 – 451.

Richard FJ, Hunt JH. Intracolony chemical communication in social insects [J]. *Insectes Sociaux*, 2013, 60 (3): 275 – 291.

Ross KG, Vander Meer RK, Fletcher DJC, *et al.* Biochemical phenotypic and genetic studies of two introduced fire ants and their hybrid (Hymenoptera: Formicidae) [J]. *Evolution*, 1987, 41 (2): 280 – 293.

Sorvari J, Theodora P, Turillazzi S, *et al.* Food resources, chemical signaling, and nest mate recognition in the ant *Formica aquilonia* [J]. *Behavioral Ecology*, 2008, 19 (2): 441 – 447.

Suarez AV, Holway DA, Case TJ. Patterns of spread in biological invasions dominated by long – distance jump dispersal. Insights from Argentine ants [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2001, 98 (3): 1095 – 1100.

Trager CJ. A revision of the fire ants, *Solenopsis geminata* group (Hymenoptera: Formicidae: Myrmicinae) [J]. *Journal of the New York Entomological Society*, 1991, 99 (2): 141 – 198.

Tschinkel WR. The Fire Ants [M]. Cambridge: The Belknap Press of Harvard University Press, 2006.

Valles SM, Oliver JB, Addesso KM, *et al.* Unique venom proteins from *Solenopsis invicta* X *Solenopsis richteri* hybrid fire ants [J]. *Toxicon: X*, 2021, 9 – 10: 100065.

Vander Meer RK, Lofgren CS, Alvarez FM. Biochemical evidence for hybridization in fire ants [J]. *Florida Entomologist*, 1985, 68 (3): 501 – 506.

Vander Meer RK, Lofgren CS. Use of chemical characters in defining populations of fire ants, *Solenopsis saevissima* complex (Hymenoptera: Formicidae) [J]. *Florida Entomologist*, 1988, 71 (3): 323 – 332.

Vaníčková L, Břízová R, Mendonça ADL, *et al.* Intraspecific variation of cuticular hydrocarbon profiles in the *Anastrepha fraterculus* (Diptera: Tephritidae) species complex [J]. *Journal of Applied Entomology*, 2015, 139 (9): 679 – 689.

Vinson SB. Invasion of the red imported fire ant (Hymenoptera: Formicidae): Spread, biology and impact [J]. *American Entomologist*, 1997, 43 (1): 23 – 39.

Wagner D, Tissot M, Gordon D. Task – related environment alters the cuticular hydrocarbon composition of harvester ants [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2001, 27 (9): 1805 – 1819.

Walsh J, Pontieri L, D'Ettorre P, *et al.* Ant cuticular hydrocarbons are heritable and associated with variation in colony productivity [J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2020, 287 (1928): 20201029.

Wang SP, Su CC, Zhu YJ, *et al.* Identification of *Monochamus urussovi* and *Monochamus suter* by using cuticular hydrocarbons [J]. *Plant Protection*, 2017, 43 (1): 117 – 120. [王书平, 苏翠翠, 朱雅君, 等. 表皮碳氢化合物在云杉大墨天牛和云杉小墨天牛鉴定中的应用 [J]. 植物保护, 2017, 43 (1): 117 – 120]

Ward DF, Beggs JR, Clout MN, *et al.* The diversity and origin of exotic ants arriving in New Zealand via human – mediated dispersal [J]. *Diversity and Distributions*, 2006, 12 (5): 601 – 609.

Wetterer JK. Exotic spread of *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: Formicidae) beyond North America [J]. *Sociobiology*, 2013, 60 (1): 50 – 55.

Wetterer JK. Worldwide spread of the tropical fire ant, *Solenopsis geminata* (Hymenoptera: Formicidae) [J]. *Myrmecological News*, 2011, 14: 21 – 35.

Wilgenburg EV, Felden A, Choe DH, *et al.* Learning and discrimination of cuticular hydrocarbons in a social insect [J]. *Biology Letters*, 2012, 8 (1): 17 – 20.

Xu L, Yu DJ, Chen ZL, *et al.* Detection of three important *Solenopsis*

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

spp. (Hymenoptera, Formicidae) by Real – time qualitative PCR [J]. *Plant Quarantine*, 2013, 27 (4): 65 – 68. [徐浪, 余道坚, 陈志彝, 等. 实时荧光 PCR 方法快速检测 3 种重要火蚁 [J]. 植物检疫, 2013, 27 (4): 65 – 68]

Xu M, Lu ZK, Lu YY, *et al.* Cuticular hydrocarbon chemistry, an important factor shaping the current distribution pattern of the imported fire ants in the USA [J]. *Journal of Insect Physiology*, 2018, 110: 34 – 43.

YangJJ, Ji BZ, Liu SW, *et al.* Caste characteristics of cuticular hydrocarbon in *Odontotermes formosanus* (Shiraki) [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2015, 52 (4): 862 – 868. [杨锦锦, 嵇保中, 刘曙雯, 等. 黑翅土白蚁表皮碳氢化合物的品级特征 [J]. 应用昆虫学报, 2015, 52 (4): 862 – 868]

Yang XW, Ning DD, Ni MH, *et al.* Interception of exotic ants and survey of the ant fauna at Gaoming Port, China [J]. *Asian Myrmecology*, 2019, 11: e011002.

Zeng L, Lu YY, He XF, *et al.* Identification of red imported fire ant *Solenopsis invicta* to invade mainland China and infestation in Wuchuan, Guangdong [J]. *Chinese Bulletin of Entomology*, 2005, 42 (2): 144 – 148. [曾玲, 陆永跃, 何晓芳, 等. 入侵中国大陆的红火蚁的鉴定及发生危害调查 [J]. 昆虫知识, 2005, 42 (2): 144 – 148]

Zhang HB, Li XY, Dai HG, *et al.* Analysis of cuticular hydrocarbons of termites and its application in taxonomy [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2005, 48 (4): 582 – 587. [张红兵, 李小鹰, 戴华国, 等. 白蚁表皮碳氢化合物组分鉴定及分类学意义 [J]. 昆虫学报, 2005, 48 (4): 582 – 587]

Zhao CY, He YR, Zhong F, *et al.* Analysis of cuticular hydrocarbons of *Frankliniella occidentalis* [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2011, 48 (3): 536 – 541. [赵成银, 何余容, 钟峰, 等. 西花蓟马表皮碳氢化合物成份分析 [J]. 应用昆虫学报, 2011, 48 (3): 536 – 541]

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net