



刘晓彤, 黄俊, 张娟, 李晓维, 夏小春, 吕要斌. 基于 GC-IMS 技术的不同红火蚁监测诱饵的风味成分分析 [J]. 环境昆虫学报, 2022, 44 (6): 1402–1413.

基于 GC-IMS 技术的不同红火蚁监测诱饵的风味成分分析

刘晓彤^{1,2}, 黄俊^{1*}, 张娟³, 李晓维¹, 夏小春⁴, 吕要斌^{1,2*}

(1. 浙江省农业科学院植物保护与微生物研究所, 农业农村部浙江省植保生物技术重点实验室, 省部共建农产品质量安全危害因子与风险防控国家重点实验室, 杭州 310021; 2. 南京农业大学植物保护学院, 南京 210014; 3. 浙江省园林植物与花卉研究所, 杭州 311122; 4. 山东海能科学仪器有限公司 G. A. S. 事业部, 济南 253000)

摘要: 探讨不同红火蚁 *Solenopsis invicta* Buren 监测诱饵的风味成分, 以期获得优化诱饵配方的科学依据。本文采用顶空气相色谱-离子迁移谱法分析不同红火蚁监测诱饵在 60℃ 下的气味指纹图谱, 并通过主成分分析法分析其风味物质的差异。结果共鉴定出 93 个信号峰和 87 种挥发性化合物, 载体物质 (CK) 中具有较高强度峰的化合物包括 3 种苯、2 种醇、3 种酮、2 种酯、4 种醛、1 种呋喃和 1 种烯; 自主配制的诱饵 (JR、ZR、JZ) 的风味组成相似, 较高强度峰的化合物包括 2 种醇、1 种酸、12 种醛和 1-8 桉叶素等; 市售火腿肠 (HT) 中的 3 种烯、10 种酮、1 种苯、5 种醛、1 种呋喃、3 种醚、7 种醇和 4 种酯是具有较高强度峰的化合物。主成分分析表明, CK、HT 与自主研发的诱饵聚集距离较远, 三者均单独聚为一类, 相互风味成分区别较大。综上所述, JR、ZR 和 JZ 诱饵中醛类物质较多, 而 HT 中酮类与醇类物质较为丰富。上述诱饵的风味成分分析结果能为研发精准高效的红火蚁监测专用诱饵提供重要信息。

关键词: 监测诱饵; 顶空气相色谱-离子迁移谱法; 风味成分; 气味指纹图谱; 红火蚁

中图分类号: Q968.1; S433

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2022) 06-1402-12

Analysis of flavor components of different monitoring baits for red imported fire ant (*Solenopsis invicta*) based on GC-IMS technology

LIU Xiao-Tong^{1,2}, HUANG Jun^{1*}, ZHANG Juan³, LI Xiao-Wei¹, XIA Xiao-Chun⁴, LU Yao-Bin^{1,2*}

(1. State Key Laboratory for Managing Biotic and Chemical Threats to the Quality and Safety of Agro-products, Key Laboratory of Biotechnology in Plant Protection of MOA of China and Zhejiang Province, Institute of Plant Protection and Microbiology, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China; 2. College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210014, China; 3. Institute of Garden Plants and Flowers, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 311202, China; 4. G. A. S. Department of Shandong Hanon Science Instrument Co., Ltd., Jinan 253000, China)

Abstract: In order to obtain the scientific basis for optimal bait formulation, the flavor components of different monitoring baits for red imported fire ant (*Solenopsis invicta*) were studied. Headspace-gas

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD1000500); 浙江省公益技术应用研究计划 (LGN21C140005); 浙江省“三农九方”科技协作项目 (2022SNJF075)

作者简介: 刘晓彤, 1998 年生, 山东潍坊人, 硕士研究生, 主要研究方向为农业害虫综合治理, E-mail: lxt909@163.com

* 共同通讯作者 Author for correspondence: 黄俊, 男, 博士, 副研究员, 研究方向为外来有害生物控制, E-mail: junhuang1981@126.com;

吕要斌, 男, 博士, 研究员, 研究方向为经济作物害虫绿色防控, E-mail: luyben@163.com

收稿日期 Received: 2022-07-28; 接受日期 Accepted: 2022-10-20

chromatography-ion mobility spectroscopy was used to analyze the odor fingerprints of different monitoring baits at 60°C, and principal component analysis was used to analyze the differences of flavor substances. A total of 93 signal peaks and 87 volatile compounds were identified. The compounds with high strength peaks in carrier material (CK) included 3 benzenes, 2 alcohols, 3 ketones, 2 esters, 4 aldehydes, 1 furan and 1 alkene. The flavor compositions of JR, ZR and JZ samples were similar, and the compounds with higher intensity peaks included 2 alcohols, 1 acid, 12 aldehydes and 1-8 cineole, etc. 3 alkenes, 10 ketones, 1 benzene, 5 aldehydes, 1 furan, 3 ethers, 7 alcohols and 4 esters in HT were compounds with high strength peaks. Principal component analysis showed that CK, HT and monitoring baits had a long clustering distance, and the three were clustered into a single category, with great differences in flavor components. There were more aldehydes in JR, ZR and JZ bait, and more ketones and alcohols in HT bait. The results of the above mentioned bait flavor composition analysis can provide important information for the development of accurate and efficient special bait for the monitoring of *S. invicta*.

Key words: Monitoring bait; headspace gas chromatography-ion migration spectrometry; flavor components; odor fingerprint; *Solenopsis invicta*

红火蚁 *Solenopsis invicta* Buren 原产于南美洲, 是全球公认的百种最具危险性的入侵生物之一 (Allen *et al.*, 1994), 对农林业生产、人畜健康、公共安全、生物多样性等具有严重影响 (Vision, 2013), 2003 年、2004 年分别在我国台湾和大陆发现 (曾玲等, 2005; 陆永跃和曾玲, 2015; Wang *et al.*, 2020)。目前, 红火蚁已传播至我国 12 个省 579 个县 (市、区) (数据截至 2022 年 6 月 20 日), 防控形势非常严峻。由于红火蚁严重威胁人身健康及生命安全, 受到我国政府的高度重视, 日前农业农村部等九部委联合印发关于加强红火蚁阻截防控工作的通知, 要求坚决打赢红火蚁疫情防控阻截战。

红火蚁防控技术较为成熟 (Williams *et al.*, 2001; 陆永跃等, 2019; Wang *et al.*, 2020), 而对于该疫情的控制关键还是在于如何快速发现它。在红火蚁种群较小且未在地表建立成型蚁丘的情况下, 通过目测踏查难以发现, 而使用诱饵诱集则能早期快速发现 (Lu *et al.*, 2012; 黄俊等, 2018)。诱饵诱集法是指在利用诱饵释放对红火蚁具有引诱活性的气味, 从而吸引红火蚁寻找食物并招募大量的同伴前来搬运 (Tschinkel, 2011), 最终收集觅食过程中的红火蚁以达到诱集效果。目前, 火腿肠是监测红火蚁最为常用的诱饵 (许益鏖等, 2007; 黄俊等, 2009; Hashimot *et al.*, 2019; Qin *et al.*, 2019), 即将火腿肠切成薄片与烧烤签、培养皿、锡箔纸或是专用的诱集器搭配使用。然而, 市售火腿肠是根据人的食用标准来

设计的, 其用料、工艺和添加的防腐剂对于诱集蚂蚁来说使用成本太高。而且, 火腿肠切片之后在野外的保鲜性较差, 尤其是太阳直晒后表面容易风干从而影响诱集效果。因此, 亟待从饵料的品质、诱性持续时间、保质期、使用成本等方面综合考虑, 从而开发并创制用于红火蚁监测的专用诱饵。

监测诱饵的风味物质是吸引红火蚁觅食的关键因素。通过对不同诱饵的风味成分进行分析, 能够为不断优化并改进诱饵配方提供重要信息。由于顶空气相色谱-离子迁移谱法 (headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry, HS-GC-IMS) 在挥发性有机化合物的定性和定量分析方面具有分辨率好和灵敏度极高的优点, 被广泛用于食品质量鉴定与安全分析、风味鉴定等 (钱鑫等, 2021; 陈德勇等, 2022), 因此该方法也能为红火蚁监测诱饵的风味分析提供技术手段。研究表明花生酱对红火蚁具有很好的引诱效果 (许益鏖等, 2006; 钟平生等, 2009), 通过前期野外试验也发现红火蚁对花生粉的取食选择明显优于麦麸、玉米粉和豆粕, 而且红火蚁偏好高脂类及高蛋白类的食物 (黄胜先等, 2010)。鉴于此, 本研究以花生粉作为载体物质, 并搭配不同的肉质从而配制得到 4 种不同的监测诱饵, 利用 HS-GC-IMS 技术采集这 4 种监测诱饵的气味指纹图谱, 并通过成分分析对不同诱饵的风味成分进行区分, 旨在为研发高效精准的红火蚁监测诱饵提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

供试红火蚁监测诱饵为浙江省农业科学院植物保护与微生物研究所自主研发的诱饵,标注分别为 JR (基础物质 + 鸡肉)、ZR (基础物质 + 猪肉) 和 JZ (基础物质 + 鸡肉 + 猪肉),标注 HT 为市售春都清真泡面搭档火腿肠 (产自河南省天和泰实业有限公司),对照 CK 为诱饵载体,只含基础物质,即包括花生粉、玉米淀粉、卡拉胶、食用香精香料和防腐剂等食品添加剂。

1.2 仪器与设备

FlavourSpec[®]风味分析仪 (配有 CTC 自动顶空进样器、Laboratory Analytical Viewer (LAV) 分析软件及 GC × IMS Library Search Software 定性软件,德国 G. A. S 公司产品)。

1.3 实验方法

样品制备: 1) 原料肉去杂选精: 原料肉选择鸡胸肉和猪肉,剔除品质不佳的部分,冷却至 3 ~ 5℃ 后继续加工; 2) 原料肉的腌制: 首先将原料肉剪切成小块,其次是制备腌制液,将小块的瘦肉放入腌制液中,混匀后于 4℃ 条件下腌制 24 h; 3) 原料肉的绞制: 将辅料按一定比例溶于水中,搅拌均匀后倒入腌制好的肉块中,与肉块一起混合绞制,打浆至细腻的肉泥状; 4) 原材料的混合: 将卡拉胶按一定比例溶于水中,加热至微沸后将花生粉和玉米淀粉按一定比例溶于液态胶体中,搅拌均匀后拌入肉泥,继续搅拌至均匀的流动状态,迅速倒入模具中进行冷却,冷却定型后将其切分成尺寸为 1.5 cm × 1.5 cm × 0.8 cm 的立方体小块,随后将成品小块进行紫外灭菌; 5) 包装与贮存: 将灭菌后的成品进行真空包装,4℃ 条件下低温保存。

样品前处理: 分别取 2 g 监测诱饵样品 (CK、JR、ZR、JZ 和 HT),置于 20 mL 顶空瓶中,在 60℃ 条件下孵育 20 min 后进样。

1.4 GC-IMS 测定挥发性风味化合物

顶空进样条件: 顶空孵化温度 60℃,孵化时间 20 min; 顶空进样针温度 85℃,进样量 500 μL,孵化转速 500 r/min; 不分流模式; 载气为高纯度氮气 (纯度 ≥ 99.999%)。

GC-IMS 条件: 色谱柱温度 60℃,运行分析时

间 40 min,载气高纯度氮气 (纯度 ≥ 99.999%); 漂移气 (氮气,纯度 ≥ 99.999%); 流速 150 mL/min,IMS 探测器温度为 45℃。

取上述不同配方的诱饵各 2 g,放入 20 mL 顶空进样瓶中,60℃ 孵化 20 min,经顶空进样用 FlavourSpec[®]风味分析仪进行测试,每个样品做 3 个平行,经分析可得到样品中挥发性有机物的差异谱图。

1.5 数据分析

采用 LAV (laboratory analytical viewer) 和 Reporter、Gallery Plot、Dynamic PCA 插件进行样品图谱分析,GC × IMS 内置 Library Search NIST 数据库和 IMS 数据库对物质进行定性分析,利用 Origin 2018c 作图。采用单因素方差分析比较各种挥发性有机化合物的峰强度在不同监测诱饵之间的差异性,数值以平均值 ± 标准误表示,采用 IBM SPSS Statistics 26.0 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同监测诱饵样品的 GC-IMS 分析

经 GC-IMS 对不同监测诱饵样品的风味组分进行分析。为了显示不同诱饵之间的差异,本研究采用差异比较模式。大多数信号出现在保留时间 0 ~ 1 500 s 之间,漂移时间在 1.0 ~ 1.7 ms 之间。此外发现自主研发的 3 种诱饵 (JR、ZR 和 JZ) 与火腿肠 (HT) 风味化合物之间的含量差异明显 (图 1)。在 GC × IMS 文库搜索中,于内置的 NIST 数据库和 IMS 数据库中共识别出 92 个信号峰,包括 87 个风味化合物和 5 种未识别的化合物,详见表 1。其中醇类 18 种、醛类 25 种、酮类 17 种、酯类 7 种、苯类 5 种、烯炔类 3 种、呋喃类 2 种、醚类 6 种、萜类 2 种、酸类 2 种,以及 5 种未鉴别的化合物。化合物 1-己醇、1-戊醇、苯甲醛、庚醛、己醛、乙酸、1-羟基-2-丙酮、3-羟基-2-丁酮、4-甲基-3-戊烯-2-酮、顺式-2-戊烯醛、二乙基二硫醚、3-甲基-4-丁醇、1-丁醇、2-甲基-1-丙醇、1-丙醇、乙酸异戊酯由于单体及其二聚体的存在而出现双峰。同一化合物的单体和二聚体显示出相似的保留时间,但漂移时间不同,这取决于化合物的含量。含量越高,电离区越容易形成二聚体,并且二聚体的分子量大于单体的分子量,因此一些化合物在检测过程中会有多个信号。

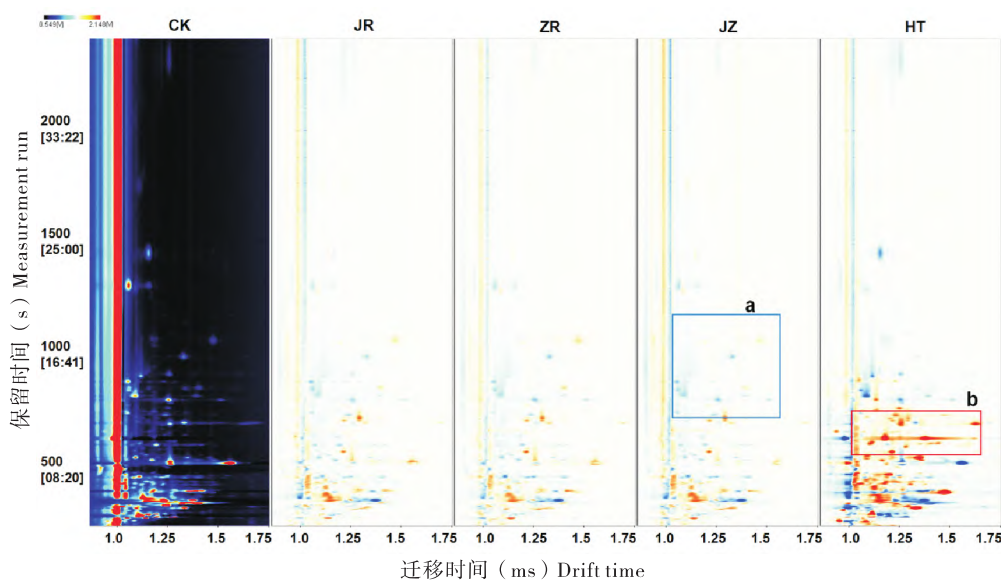


图1 不同监测诱饵样品中挥发性物质成分对比差异谱图

Fig. 1 Comparative difference spectrum of volatile components in different monitoring bait samples

注: 图中 CK、JR、ZR、JZ 和 HT 为供试诱饵的标注, 下同。以 CK 为参比, 其余谱图扣除 CK 中的信号峰, 得到二者的差异谱图。蓝色区域说明该物质在此样品中较 CK 低, 如图中 a 区域, 红色区域说明该物质在此样品中较 CK 多, 如图中 b 区域。颜色越深, 说明差异越大。Note: CK, JR, ZR, JZ and HT in the figure were the labels of test baits, the same as below. CK was taken as the reference, and the signal peaks in CK were deducted from the other spectrograms to obtain the difference spectrograms of them. The blue area indicated that the substance was lower than CK in this sample, as shown in region A in the figure. The red area indicated that this substance was more than CK in this sample, as shown in region B in the figure. The darker the color, the greater the difference.

表 1 不同监测诱饵的挥发性有机化合物 (n=3)
Table 1 Flavor compounds in different monitoring baits

化合物名称 Name of compound	峰强度 Peak intensity				
	CK	JR	ZR	JZ	HT
甲基乙酸 Propanoic acid	552.23 ± 35.73 c	715.23 ± 68.78 ab	640.64 ± 62.01 bc	739.42 ± 33.86 a	625.88 ± 33.96 bc
苯甲醛 (单体) Benzaldehyde-M	1 792.63 ± 31.52 b	1 794.85 ± 60.75 b	1 906.97 ± 50.44 a	1 876.90 ± 33.75 a	378.87 ± 10.05 c
苯甲醛 (二聚体) Benzaldehyde-D	258.27 ± 5.72 a	271.43 ± 37.51 a	247.26 ± 16.29 a	262.88 ± 12.17 a	189.47 ± 22.79 b
癸醛 Decanal	227.66 ± 24.71 a	225.02 ± 16.00 a	250.68 ± 26.85 a	241.23 ± 21.81 a	268.59 ± 53.43 a
桉烯 Junipene	389.04 ± 33.39 a	458.77 ± 28.21 a	515.05 ± 130.09 a	468.77 ± 50.86 a	506.61 ± 16.55 a
乙酸 (单体) Acetic acid-M	5 134.76 ± 363.45 b	4 791.94 ± 88.71 b	4 825.95 ± 254.45 b	4 467.78 ± 175.66 b	6 392.02 ± 702.15 a
乙酸 (二聚体) Acetic acid-D	409.44 ± 54.67 b	338.70 ± 19.47 b	335.70 ± 22.89 b	281.78 ± 18.76 b	638.46 ± 170.06 a
1-戊烯-3-醇 1-Penten-3-ol	108.11 ± 9.61 a	108.01 ± 7.18 a	103.91 ± 14.19 a	93.95 ± 4.63 a	93.35 ± 6.97 a

续表 1 Continued table 1

化合物名称 Name of compound	峰强度 Peak intensity				
	CK	JR	ZR	JZ	HT
壬醛 Nonanal	669.89 ± 57.07 c	1 091.85 ± 43.43 ab	1 186.49 ± 119.29 a	967.22 ± 35.94 b	568.94 ± 67.28 c
己醇 (单体) 1-Hexanol-M	982.23 ± 227.38 a	494.99 ± 80.82 bc	579.59 ± 313.13 bc	291.81 ± 11.57 c	744.03 ± 98.59 ab
己醇 (二聚体) 1-Hexanol-D	133.11 ± 13.53 a	117.01 ± 14.25 a	114.46 ± 13.16 a	117.88 ± 20.28 a	129.75 ± 13.28 a
乙基吡嗪 Ethylpyrazine	74.46 ± 2.62 b	62.75 ± 7.34 c	59.77 ± 5.16 c	62.62 ± 5.77 c	147.65 ± 3.52 a
6-甲基-5-庚烯-2-酮 6-Methyl-5-hepten-2-one	106.10 ± 7.20 b	100.83 ± 3.17 bc	91.67 ± 3.67 c	96.62 ± 7.28 bc	146.69 ± 5.43 a
1-羟基-2-丙酮 (单体) 1-Hydroxy-2-propanone-M	1 003.55 ± 270.76 b	877.25 ± 19.34 b	917.60 ± 30.45 b	918.19 ± 20.36 b	2 172.54 ± 107.19 a
1-羟基-2-丙酮 (二聚体) 1-Hydroxy-2-propanone-D	122.66 ± 33.57 b	90.48 ± 11.24 b	91.04 ± 5.63 b	84.58 ± 3.68 b	325.05 ± 29.00 a
3-羟基-2-丁酮 (单体) 3-Hydroxy-2-butanone-M	749.99 ± 47.85 b	559.15 ± 17.36 b	629.58 ± 23.82 b	633.80 ± 26.71 b	1 161.94 ± 346.47 a
3-羟基-2-丁酮 (二聚体) 3-Hydroxy-2-butanone-D	162.49 ± 17.65 a	134.46 ± 17.56 a	135.04 ± 3.64 a	129.47 ± 2.87 a	136.36 ± 51.99 a
辛醛 Octanal	308.35 ± 43.96 b	532.10 ± 22.25 a	562.26 ± 114.62 a	545.49 ± 15.08 a	270.42 ± 33.39 b
甲基吡嗪 2-Methylpyrazine	1 892.07 ± 100.52 a	1 209.74 ± 60.28 b	1 271.08 ± 43.64 b	1 160.25 ± 50.38 b	331.39 ± 4.41 c
顺式-4-庚烯醛 Cis-4-Heptenal	148.08 ± 15.64 b	115.54 ± 14.71 b	127.55 ± 13.21 b	113.04 ± 4.69 b	829.19 ± 32.74 a
戊醇 (单体) 1-Pentanol-M	1 589.41 ± 79.77 a	1 086.35 ± 50.88 b	1 089.92 ± 173.63 b	951.43 ± 10.23 b	757.58 ± 17.71 c
戊醇 (二聚体) 1-Pentanol-D	256.47 ± 28.74 a	130.22 ± 13.14 bc	135.81 ± 36.6 b	101.27 ± 2.09 bc	91.43 ± 4.82 c
戊基呋喃 2-Pentylfuran	186.91 ± 15.81 bc	200.15 ± 8.99 b	170.99 ± 4.27 c	194.42 ± 14.06 b	749.13 ± 8.32 a
二乙基二硫醚 (单体) Diethyl disulfide-M	71.61 ± 6.20 b	51.27 ± 1.56 b	54.62 ± 5.03 b	50.75 ± 1.83 b	579.00 ± 78.01 a
甲硫基丙醛 Methional	52.65 ± 8.39 c	128.07 ± 7.55 b	123.57 ± 5.11 b	130.26 ± 2.05 b	346.89 ± 67.52 a
2-甲基-1-丙醇 (单体) 2-Methyl-1-propanol-M	688.34 ± 299.38 b	189.47 ± 24.82 c	309.77 ± 136.69 c	156.33 ± 5.88 c	1 054.01 ± 17.52 a
2-甲基-1-丙醇 (二聚体) 2-Methyl-1-propanol-D	79.74 ± 53.2 b	19.57 ± 1.39 c	30.20 ± 9.37 c	19.09 ± 1.27 c	192.87 ± 14.67 a
庚酮 (单体) 2-Heptanone-M	1 036.11 ± 12.33 a	936.68 ± 12.14 c	904.95 ± 7.13 d	923.53 ± 20.57 cd	2 975.44 ± 19.00 a

续表 1 Continued table 1

化合物名称 Name of compound	峰强度 Peak intensity				
	CK	JR	ZR	JZ	HT
庚酮 (二聚体) 2-Heptanone-D	323.41 ± 21.04 b	321.76 ± 19.13 b	283.33 ± 18.28 c	322.30 ± 18.88 b	2 218.14 ± 14.40 a
柠檬烯 Limonene	36.65 ± 3.65 c	127.83 ± 2.64 b	147.45 ± 19.21 a	157.08 ± 8.68 a	152.14 ± 9.02 a
1, 8-桉叶素 1, 8-Cineole	15.21 ± 3.39 d	336.50 ± 21.89 a	283.62 ± 13.56 b	346.11 ± 9.81 a	198.96 ± 1.56 c
戊烯-3-酮 1-Penten-3-ol	496.79 ± 6.20 c	548.40 ± 8.96 b	453.04 ± 5.83 d	507.02 ± 17.26 c	1 152.47 ± 4.86 a
丁醇 (单体) 1-Butanol-M	482.81 ± 18.46 b	355.32 ± 19.07 c	378.51 ± 26.11 c	349.47 ± 7.89 c	4 181.01 ± 10.76 a
丁醇 (二聚体) 1-Butanol-D	97.48 ± 2.17 b	90.88 ± 14.59 b	84.76 ± 8.55 b	88.24 ± 6.08 b	4 245.87 ± 13.33 a
甲基-3-戊烯-2-酮 (单体) 4-Methyl-3-penten-2-one-M	551.85 ± 34.79 b	486.81 ± 7.64 c	477.39 ± 21.65 c	530.40 ± 7.55 b	1 910.04 ± 4.68 a
4-甲基-3-戊烯-2-酮 (二聚体) 4-Methyl-3-penten-2-one-D	44.86 ± 4.55 b	33.33 ± 5.01 b	35.21 ± 0.70 b	32.21 ± 2.70 b	414.61 ± 14.57 a
乙酸乙酯 Ethyl crotonate	762.65 ± 12.68 a	469.51 ± 9.80 c	460.45 ± 13.93 c	463.65 ± 16.74 c	517.54 ± 7.11 b
乙酸异戊酯 (单体) Isoamyl acetate-M	93.28 ± 9.10 b	93.85 ± 2.46 b	102.62 ± 9.18 b	93.94 ± 4.26 b	564.89 ± 8.15 a
乙酸异戊酯 (二聚体) Isoamyl acetate-D	49.68 ± 7.00 b	54.86 ± 7.64 b	47.71 ± 4.43 b	50.49 ± 7.06 b	104.99 ± 2.02 a
β-蒎烯 beta-Pinene	99.82 ± 13.40 d	482.8 ± 18.27 c	576.63 ± 35.61 b	615.30 ± 37.69 b	1 556.00 ± 70.08 a
顺式-2-戊烯醛 (单体) (Z) -2-Pentenal-M	1 126.52 ± 26.49 b	795.68 ± 6.63 c	787.19 ± 21.63 c	775.79 ± 16.90 c	2 630.82 ± 48.68 a
顺式-2-戊烯醛 (二聚体) (Z) -2-Pentenal-D	386.15 ± 15.69 b	259.02 ± 6.99 c	252.40 ± 13.70 c	254.51 ± 6.79 c	4 558.03 ± 119.31 a
2-甲基-1-丙醇 (单体) 2-Methyl-1-propanol-M	921.57 ± 132.15 b	538.53 ± 27.49 c	605.53 ± 106.68 c	553.57 ± 12.27 c	1 512.40 ± 16.96 a
2-甲基-1-丙醇 (二聚体) 2-Methyl-1-propanol-D	113.99 ± 20.38 c	151.63 ± 9.13 b	141.01 ± 16.66 b	138.74 ± 5.66 b	754.45 ± 2.95 a
己醛 (单体) Hexanal-M	4 166.25 ± 57.46 b	4 248.70 ± 58.71 ab	4 290.92 ± 24.04 a	4 348.25 ± 43.77 a	2 391.39 ± 107.65 c
己醛 (二聚体) Hexanal-D	5 672.01 ± 882.81 b	7 494.74 ± 374.79 a	7 426.89 ± 746.27 a	7 073.87 ± 172.08 a	901.98 ± 124.01 c
环己醇 Hexan-2-one	270.20 ± 11.42 b	252.28 ± 8.23 bc	248.39 ± 12.83 c	257.79 ± 7.13 bc	592.35 ± 8.34 a
2, 3-戊二酮 2, 3-Pentanedione	184.07 ± 10.39 b	146.37 ± 4.97 b	150.88 ± 3.42 b	153.18 ± 2.92 b	2 965.32 ± 49.59 a

续表 1 Continued table 1

化合物名称 Name of compound	峰强度 Peak intensity				
	CK	JR	ZR	JZ	HT
丙醇 (单体) 1-Propanol-M	1 157.32 ± 48.39 a	794.36 ± 136.62 b	754.48 ± 249.28 b	628.83 ± 61.93 b	1 357.90 ± 17.74 a
丙醇 (二聚体) 1-Propanol-D	420.69 ± 9.33 b	259.69 ± 43.86 c	230.36 ± 71.71 c	187.90 ± 9.15 c	621.55 ± 33.90 a
噻吩 Thiophene	2 683.19 ± 52.67 d	4 037.56 ± 35.77 b	3 816.77 ± 48.79 c	4 051.90 ± 47.32 b	5 566.46 ± 10 a
4-甲基-2-戊酮 4-Methyl-2-pentanone	540.27 ± 17.34 d	594.93 ± 42.97 c	604.58 ± 4.91 bc	645.80 ± 18.89 b	1 991.41 ± 15.43 a
乙酸丙酯 Propyl acetate	373.94 ± 45.56 d	495.58 ± 36.88 c	656.20 ± 75.11 b	588.62 ± 54.26 bc	13 078.81 ± 64.63 a
乙醇 Ethanol	13 793.76 ± 292.09 d	21 562.93 ± 142.08 b	20 907.15 ± 278.39 c	21 962.57 ± 75.17 b	26 949.52 ± 235.42 a
甲基丁醛 3-Methylbutanal	3 971.57 ± 32.89 b	4 546.10 ± 29.82 a	4 599.98 ± 44.26 a	4 544.16 ± 22.69 a	1 698.20 ± 9.88 c
丁醇 2-Butanol	6 216.53 ± 84.44 b	6 330.07 ± 94.07 b	6 284.83 ± 34.64 b	6 303.36 ± 53.11 b	8 579.00 ± 32.68 a
甲基-2-丙醇 tert-Butanol	3 053.16 ± 60.56 a	3 004.80 ± 44.43 ab	2 948.50 ± 14.00 b	3 033.20 ± 16.85 a	2 295.09 ± 2.98 c
乙酸乙酯 Ethyl Acetate	2 225.80 ± 113.54 e	3 178.54 ± 127.44 c	2 953.25 ± 71.97 d	3 398.00 ± 132.58 b	10 963.03 ± 82.03 a
丙烯醛 Acrolein	465.92 ± 34.33b c	443.71 ± 29.39 bc	430.51 ± 9.17 c	474.12 ± 6.45 b	1 614.86 ± 13.16 a
丙酮 Acetone	10 486.37 ± 29.94 d	11 030.23 ± 31.17 b	10 876.40 ± 24.57 c	11 032.40 ± 39.5 b	19 728.65 ± 63.82 a
丙醛 Propanal	1 105.52 ± 83.55 b	1 602.28 ± 556.44 ab	1 461.75 ± 984.25 ab	2 211.35 ± 235.54 a	962.33 ± 79.72 b
甲基吡嗪 2-Methylpyrazine	1 772.47 ± 13.49 a	1 699.73 ± 36.08 b	1 643.90 ± 51.68 b	1 687.59 ± 23.09 b	319.59 ± 18.76 c
二甲基硫醚 Dimethyl sulfide	685.79 ± 17.29 c	846.66 ± 61.15 b	697.48 ± 92.63 c	917.74 ± 22.24 b	3 609.47 ± 109.88 a
乙醛 Acetaldehyde	1 214.52 ± 68.39 a	1 183.44 ± 88.01 a	1 192.16 ± 123.35 a	1 342.46 ± 47.04 a	1 248.42 ± 49.78 a
二乙基二硫醚 (二聚体) Diethyl disulfide-D	1 686.70 ± 53.65 c	2 192.55 ± 23.21 a	2 121.34 ± 27.40 b	2 182.84 ± 37.07 ab	416.87 ± 17.39 d
乙酸甲酯 Methyl acetate	1 064.72 ± 24.11 a	853.53 ± 37.80 b	814.85 ± 16.06 b	808.33 ± 23.92 b	115.33 ± 6.72 c
2, 5-二甲基呋喃 2, 5-Dimethyl furan	3 731.83 ± 96.71 a	647.23 ± 34.73 c	830.13 ± 23.57 b	605.56 ± 40.32 c	40.61 ± 3.60 d
戊醛 Pentanal	1 074.15 ± 330.19 b	1 709.44 ± 183.62 a	1 730.72 ± 574.78 a	1 866.08 ± 65.83 a	1 409.23 ± 10.12 ab

续表 1 Continued table 1

化合物名称 Name of compound	峰强度 Peak intensity				
	CK	JR	ZR	JZ	HT
戊酮 2-Pentanone	1 377.27 ± 59.12 a	969.37 ± 58.99 b	967.00 ± 78.72 b	969.8 ± 28.27 b	279.64 ± 4.89 c
2, 3-丁二酮 2, 3-Butanedione	977.98 ± 97.80 a	604.02 ± 21.65 c	752.31 ± 34.80 b	662.43 ± 9.29 c	410.67 ± 10.37 d
庚醛 (单体) Heptanal-M	809.31 ± 126.36 b	1 104.12 ± 72.67 a	1 081.90 ± 136.75 a	1 143.37 ± 28.61 a	317.66 ± 25.49 c
庚醛 (二聚体) Heptanal-D	118.82 ± 37.37 b	214.60 ± 20.93 a	219.31 ± 66.98 a	243.91 ± 9.20 a	69.64 ± 5.25 b
对二甲苯 p-Xylene	154.50 ± 9.29 a	49.76 ± 5.25 c	94.45 ± 3.18 b	56.81 ± 7.33 c	160.46 ± 4.98 a
丁醛 Butanal	215.88 ± 33.06 b	304.38 ± 62.99 ab	313.59 ± 143.98 ab	409.16 ± 24.53 a	78.15 ± 2.35 c
戊烯-3-酮 1-Penten-3-ol	787.11 ± 6.88 a	484.48 ± 9.22 c	567.71 ± 7.80 b	457.33 ± 6.05 d	463.81 ± 9.55 d
丙醇 2-Propanol	4 789.18 ± 88.53 c	5 038.35 ± 47.32 b	5 203.19 ± 52.40 a	5 034.11 ± 69.11 b	3 410.17 ± 70.79 d
丙酸丁酯 Butyl propionate	125.72 ± 9.10 d	169.88 ± 11.61 a	134.63 ± 13.33 cd	156.28 ± 4.82 ab	145.68 ± 4.68 bc
苯乙烯 Styrene	680.12 ± 39.36 a	536.08 ± 59.35 b	564.31 ± 23.98 b	521.74 ± 16.91 b	586.66 ± 19.83 b
2, 5-二甲基吡嗪 2, 5-Dimethylpyrazine	602.45 ± 33.90 a	433.27 ± 6.11 b	425.25 ± 11.10 b	444.4 ± 18.79 b	58.45 ± 6.32 c
反式-2-庚烯醛 E-2-Heptenal	343.09 ± 6.38 a	230.27 ± 13.34 d	305.29 ± 17.72 b	273.37 ± 22.48 c	67.21 ± 8.00 e
甲硫基丙醛 Methional	318.85 ± 76.06 b	440.44 ± 31.90 a	427.91 ± 61.05 a	497.75 ± 18.81 a	191.89 ± 13.67 c
反式-2-己烯醛 (E) -2-Hexenal	169.96 ± 2.65 a	116.03 ± 8.42 c	140.18 ± 2.33 b	129.37 ± 4.31 b	129.78 ± 10.34 b
反式-2-辛烯醛 (E) -2-Octenal	136.02 ± 12.75 a	127.85 ± 10.67 a	138.79 ± 11.17 a	128.61 ± 6.03 a	90.31 ± 14.01 b
苯乙醛 Phenylacetaldehyde	1 354.67 ± 8.89 a	1 186.77 ± 93.48 b	960.10 ± 43.24 c	1 056.20 ± 8.32 bc	559.81 ± 137.31 d
反式-2-戊烯醛 (E) -2-Pentenal	97.02 ± 1.60 b	46.95 ± 2.19 d	64.38 ± 10.10 c	45.86 ± 0.59 d	207.35 ± 14.13 a
二甲基二硫醚 Dimethyl disulfide	213.48 ± 7.81 a	107.85 ± 4.39 b	112.98 ± 2.07 bc	99.77 ± 2.92 c	221.70 ± 8.15 a
丁醇 2-Butanol	233.99 ± 5.96 b	182.74 ± 9.59 d	210.31 ± 4.88 c	210.31 ± 1.74 c	249.79 ± 3.30 a
未知 1 Unknow 1	130.53 ± 14.51 b	107.13 ± 3.89 c	101.51 ± 4.08 c	101.87 ± 0.62 c	267.48 ± 18.39 a

续表 1 Continued table 1

化合物名称 Name of compound	峰强度 Peak intensity				
	CK	JR	ZR	JZ	HT
未知 2	62.78 ±	37.31 ±	54.36 ±	55.93 ±	163.79 ±
Unknow 2	2.70 b	3.48 d	6.94 c	4.10 bc	2.72 a
未知 3	97.35 ±	70.57 ±	69.59 ±	72.73 ±	222.33 ±
Unknow 3	4.78 b	4.63 c	1.05 c	1.33 c	3.91 a
未知 4	172.82 ±	96.42 ±	107.18 ±	83.25 ±	163.36 ±
Unknow 4	15.95 a	1.50 bc	15.93 b	2.76 c	9.05 a
未知 5	2 500.76 ±	2 797.02 ±	2 629.67 ±	2 886.90 ±	464.30 ±
Unknow 5	167.12 c	140.10 ab	87.35 bc	52.89 a	9.68 d

注: 信号强度值用平均值 ± 标准误表示; 同行具相同小写字母表示不同监测诱饵间无显著差异 ($P > 0.05$)。Notice: The values of signal intensity were expressed as mean ± standard error. The same lowercase letters in the same line indicated no significant differences among different monitoring baits ($P > 0.05$).

2.2 不同监测诱饵样品风味组分 GC-IMS 指纹图谱分析

为了进一步分析不同监测诱饵样品之间挥发性有机物的差异, 利用 GC-IMS 内置的 Gallery Plot 插件构建不同监测诱饵样品挥发有机物的指纹图谱, 以识别不同诱饵样品的特征峰区域 (图 2)。在试验中发现了每种样品的完整挥发性有机物信息以及样品之间挥发性有机物的差异。不同诱饵的挥发性有机物分布不同, 各自有特征峰区域 (贡献较大物质区域), 同时也存在共同区域。样品 CK 的主要风味成分由苯类、醇类、呋喃类、酮类、酯类和醛类物质组成, 其中 2-甲基吡嗪、2,5-二甲基吡嗪、巴豆酸乙酯、乙酸甲酯、1-己醇、1-戊醇、2-戊酮、2,3-戊二酮、1-戊烯-3-酮、2,5-二甲基呋喃、苯乙醛、E-2-庚烯醛、E-2-己烯醛、2-甲基丙醛、对二甲苯、苯乙烯等物质对整体风味贡献较大; JR、ZR、JZ 3 个样品的气味组成比较相似, 主要由醇类、酸类、醛类组成, 其中 1-辛烯-3-醇、丙酸、E-2-辛烯醛、苯甲醛、壬醛、辛醛、庚醛、己醛、戊醛、3-甲基丁醛、丁醛、丙醛、乙醛、乙缩醛甲硫基丙醛、2-丙醇、1,8-桉叶素等物质对整体风味贡献较大; HT 中的风味组成主要为烯炔类、酮类、苯类、醛类、呋喃类、醚类、醇类和酯类, 其中噻吩、柠檬烯、桉烯、 β -蒎烯、乙酸、乙基吡嗪、6-甲基-5-庚烯-2-酮、1-羟基-2-丙酮、3-羟基-2-丁酮、2-庚酮、4-甲基-3-戊烯-2-酮、2-己酮、2,3-戊二酮、4-甲基-2-戊酮、2-丁酮、丙酮、癸醛、顺式-4-庚烯醛、反式-2-戊烯醛、顺式-2-戊烯醛、丙烯醛、2-戊基呋喃、二

乙基二硫醚、3-甲基-1-丁醇、1-戊烯-3-醇、1-丁醇、2-甲基-1-丙醇、2-丁醇、1-丙醇、乙醇、丙酸丁酯、乙酸异戊酯、乙酸丙酯、乙酸乙酯、二甲基硫醚、二甲基二硫醚等物质对整体风味贡献较大。所有诱饵处理中, 乙醇、丙酮、2-丁醇和乙酸均是相同且含量较高的物质, 而 HT 处理中乙酸乙酯、乙酸丙酯和顺式-2-戊烯醛是区别较大且含量较高的物质。

2.3 基于主成分分析的不同监测诱饵相似度分析

通过对于不同监测诱饵的主成分进行分析并作图, 其中在主成分分析图及 PCA 确定的前两个主成分的分布图中分别描述了累积方差贡献率的 78% 和 17%, 主成分分析结果显示了样本间的特征差异和聚类趋势。由此发现自主研发的 JR、ZR、JZ 3 种监测诱饵样本紧密聚集在一起, 而 CK、HT 与自主研发的诱饵聚集距离较远, 三者均单独聚为一类, 相互风味成分区别较大 (图 3)。

3 结论与讨论

红火蚁是一种真社会性昆虫, 个体之间有着丰富的生理及行为交流活动 (Vander *et al.*, 1988), 例如觅食、招募及搬运行为 (Vander *et al.*, 2010)。根据红火蚁觅食过程中的行为特点, 采用诱饵诱集法以快速发现红火蚁是目前其调查监测的关键技术 (Lu *et al.*, 2012)。而监测所用的诱饵是保障该项技术得以实效的关键物质, 它所释放的气味是否对红火蚁具有吸引作用是其研发中需要关注的重要因素。前人研究发现, 红

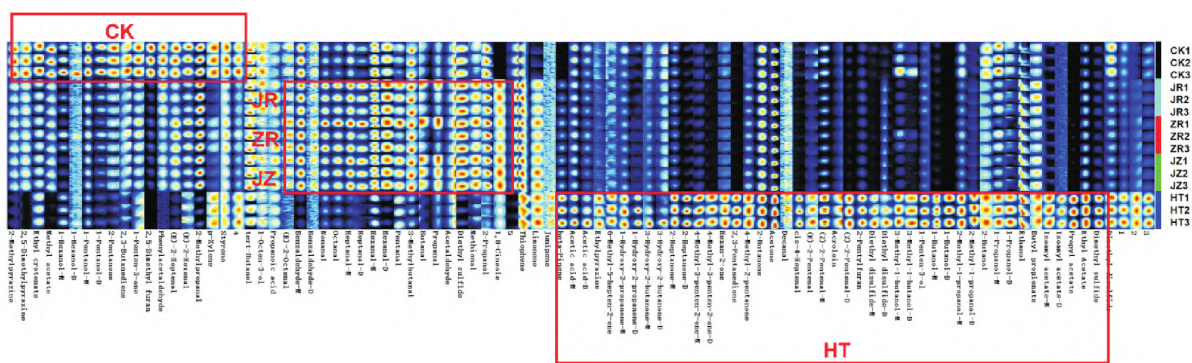


图 2 不同监测诱饵样品气相离子迁移谱指纹图谱

Fig. 2 Fingerprint of different monitoring bait samples by gas phase ion mobility spectrometry

注: 图中每一行代表一个样品中选取的全部信号峰, 每一列表示同一挥发性有机物在不同诱饵样品中信号峰强度, 图中每个亮点均代表着一种挥发性有机物, 点的颜色越深, 表明此挥发性有机物的含量越高, 贡献越大。部分物质后面标注 M 和 D, 是表示同一个物质的单体 (Monomer) 与二聚体 (Dimer), 而数字编号表示未鉴定出的峰。Note: Each row in the figure represented all signal peaks selected from a sample, and each column represents the signal peak intensity of the same volatile organic compounds in different bait samples. Each bright spot in the figure represented a volatile organic compound, and the darker the dot, the higher the content of the volatile organic compound, the greater the contribution. Some compounds were marked with M and D, which represented Monomer and Dimer of the same compound, while the number referred to unidentified peaks.

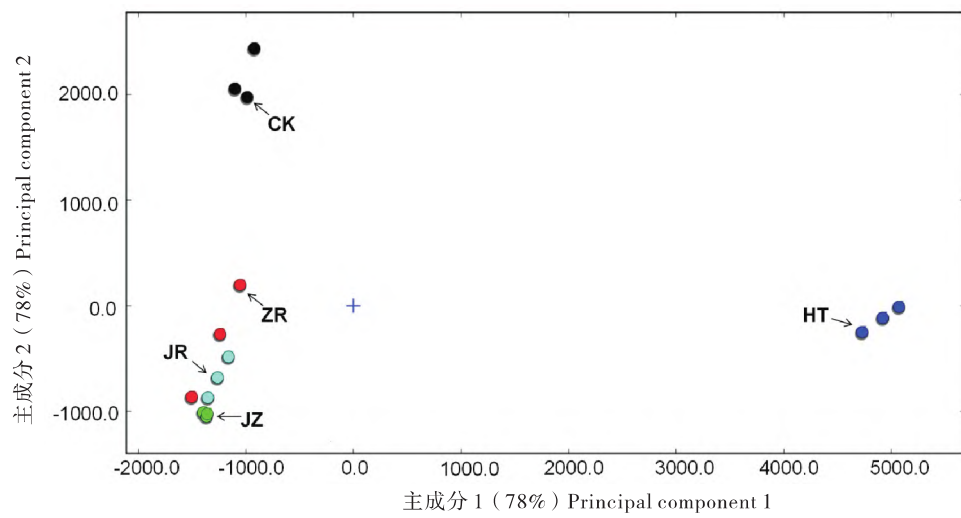


图 3 不同监测诱饵获得的信号强度的主成分分析

Fig. 3 Principal component analysis of signal intensity of different monitoring baits

火蚁偏好高脂类及高蛋白质类的物质 (许益鏊等, 2007; 黄胜先等, 2010; 陈利民等, 2019)。例如美国于 1961 年开始大面积防治红火蚁时, 将大豆油和玉米颗粒添加到毒饵中, 从而明显提高红火蚁的搬运效率 (Lofgren *et al.*, 1972); 在鱼粉、甘蔗粉、玉米粉、火腿肠提取液及花生油对红火蚁触角电位反应试验中发现, 鱼粉反应值最大 (陆军等, 2007); 而且脂类含量较高花生酱也是对红火蚁具有很好的引诱效果 (许益鏊等, 2006; 钟平

生等, 2009)。然而, 也有学者发现红火蚁对糖类物质也有偏好 (Alder & Silverman, 2005), 将化学药剂添加到糖水中诱杀红火蚁, 能在 15 个月后蚁巢减少了 92% (Greenberg *et al.*, 2003)。因此, 高脂类及高蛋白质类物质是红火蚁监测诱饵研发中考虑的主要成分, 通过结合国内外研究报道, 本研究选择花生粉和肉类物质, 同时与现在监测中国常用的火腿肠进行风味分析比较。

本研究共鉴定出 93 个峰和 87 种化合物, 其中

包括 11 种醇、20 种醛、12 种酮、6 种酯、3 种烯烃、2 种醚和 2 种呋喃; 自主研发的 3 种诱饵 (JR、ZR 和 JZ) 与火腿肠 (HT) 风味化合物之间的含量差异明显, 而且相互之间的挥发有机物指纹图谱也有明显区别, 贡献值较大的风味物质落在不同的区间上。总体而言, 火腿肠在红火蚁的调查监测中还是取得较好的应用效果, 但是它的野外保鲜性和使用成本是其大面积推广应用的制约因素。因此研发的诱饵如何扬长避短, 即能保留火腿肠的优点又能规避其野外使用的缺点, 是今后快速取得研发效果的有利思路。本研究发现火腿肠处理中乙酸乙酯、乙酸丙酯和顺式-2-戊烯醛是与其它几种监测诱饵区别较大且含量较高的物质, 已有较多报道乙酸乙酯对一些农业害虫具有显著的诱集活性 (宫庆涛等, 2014), 但是这 3 种物质是否在吸引红火蚁上有作用还值得进一步深入探究。今后还需要结合 Y 形嗅觉、触角电位等试验以及大田引诱红火蚁试验, 进一步优化诱饵配方, 尤其还需要考虑环境温度对诱饵气味物质挥发的影响。

参考文献 (References)

- Alder P, Silverman J. Effects of interspecific competition between two urban ant species, *Linepithema humile* and *Monomorium minimum*, on toxic bait performance [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2005, 98 (2): 493–501.
- Allen CR, Demaris S, Lutz RS. Red imported fire ant impact on wildlife: An overview [J]. *Texas Journal of Science*, 1994, 46: 51–59.
- Chen DY, Zhang ZZ, Zhao SS, *et al.* Identification of Fritillariae from different origins based on gas chromatography-ion mobility spectrometry combined with multivariate statistical analysis [J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2022, 13 (1): 19–26. [陈德勇, 张泽洲, 赵珊珊, 等. 气相色谱-离子迁移谱法结合多元统计分析方法鉴定不同产地贝母 [J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13 (1): 19–26]
- Gong QT, Zhao ZM, Sun RH, *et al.* Electrophysiological activity of some materials to Chinese citrus fly and their attraction in field [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2014, 36 (1): 95–101. [宫庆涛, 赵志模, 孙瑞红, 等. 多种物质对柑桔大实蝇的电生理活性及田间引诱效果评价 [J]. 环境昆虫学报, 2014, 36 (1): 95–101]
- Greenberg L, Reiersen D, Rust MK. Fipronil trials in California against the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren, using sugar water consumption and mound counts as measures of ant abundance [J]. *Journal of Agricultural and Urban Entomology*, 2003, 20 (4): 221–233.
- Hashimoto Y, Yoshimura M, Huang RN. Wasabi versus red imported fire ants: Preliminary test of repellency of microencapsulated allyl isothiocyanate against *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) using bait traps in Taiwan [J]. *Applied Entomology and Zoology*, 2019, 54: 193–196.
- Huang J, Lu YY, Xu YJ, *et al.* Relationship between mound size of red imported fire ant and number of trap workers [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2009, 8: 1992–1997. [黄俊, 陆永跃, 许益鏊, 等. 红火蚁蚁丘大小与诱集工蚁数量的关系 [J]. 应用生态学报, 2009, 8: 1992–1997]
- Huang J, Wang LK, Zhi FY, *et al.* Rapid field identification of red imported fire ants based on external morphological characteristics [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2018, 40 (3): 715–720. [黄俊, 王丽坤, 智伏英, 等. 基于外部形态特征的红火蚁野外快速识别方法研究 [J]. 环境昆虫学报, 2018, 40 (3): 715–720]
- Huang SS, Chen XQ, Liu JW, *et al.* Bait selectivity research of red imported fire ant (*Solenopsis invicta*) [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2010, 37 (7): 105–106. [黄胜先, 陈晓琴, 刘俊武, 等. 红火蚁饵料选择性研究 [J]. 广东农业科学, 2010, 37 (7): 105–106]
- Lofgren CS, Weidhaas DE. On the eradication of imported fire ants: A theoretical appraisal [J]. *Bulletin of the Entomological Society of America*, 1972, 18 (1): 17.
- Lu J, Zhang SH, Zhang Q, *et al.* EAG test of red fire ants on several baits [J]. *Plant Quarantine*, 2007, S1: 37–39. [陆军, 张绍红, 张强, 等. 红火蚁对几种饵剂的 EAG 试验 [J]. 植物检疫, 2007, S1: 37–39]
- Lu YY, Wang L, Xu YJ, *et al.* Correlation of the nest density and the number of workers in bait traps for fire ants (*Solenopsis invicta*) in Southern China [J]. *Sociobiology*, 2012, 59 (3): 1197–1204.
- Lu YY, Zeng L, Xu YJ, *et al.* Advances in invasive biology and control of red imported fire ant [J]. *Journal of South China Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2019, 40 (5): 149–160. [陆永跃, 曾玲, 许益鏊, 等. 外来物种红火蚁入侵生物学与防控研究进展 [J]. 华南农业大学学报 (自然科学版), 2019, 40 (5): 149–160]
- Lu YY, Zeng L. 10 years after red imported fire ant found to invade China: History, current situation and trend of its infestation [J]. *Plant Quarantine*, 2015, 29 (2): 1–6. [陆永跃, 曾玲. 发现红火蚁入侵中国 10 年: 发生历史、现状与趋势 [J]. 植物检疫, 2015, 29 (2): 1–6]
- Qian X, Li ZM, Song JH, *et al.* Research progress on the determination of volatile organic compounds of agro-food by gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2021, 12 (18): 7184–7190. [钱鑫, 李占明, 宋嘉慧, 等. 气相色谱-离子迁移谱法检测农产食品中挥发性有机化合物的研究进展 [J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12 (18): 7184–7190]
- Qin WQ, Chen X, Hooper-Bui LM, *et al.* Food-burying behavior in red imported fire ants (Hymenoptera: Formicidae) [J]. *PeerJ*, 2019, 7: e6349.

- Tschinkel WR. The organization of foraging in the fire ant, *Solenopsis invicta* [J]. *Journal of Insect Science*, 2011, 11 (26): 1–30.
- Vander Meer RK, Alvarez F, Lofgren CS. Isolation of the trail recruitment pheromone of *Solenopsis invicta* [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1988, 14: 825–838.
- Vander Meer RK, Preston CA, Choi M. Isolation of a pyrazine alarm pheromone component from the fire ant, *Solenopsis invicta* [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2010, 36 (2): 163–170.
- Vinsion SB. Impact of the invasion of the imported fire ant [J]. *Insect Science*, 2013, 20: 439–455.
- Wang FX, Zhang RZ, Hou YM, *et al.* Review on the control of the red imported fire ants according to law [J]. *Plant Quarantine*, 2016, 30 (1): 77–81. [王福祥, 张润志, 侯有明, 等. 依法防控红火蚁的若干思考 [J]. 植物检疫, 2016, 30 (1): 77–81]
- Wang L, Zeng L, Xu Y, *et al.* Prevalence and management of *Solenopsis invicta* in China [J]. *NeoBiota*, 2020, 54: 89–124.
- Williams DF, Collins HL, Oi DH. The red imported fire ant (Hymenoptera: Formicidae): An historical perspective of treatment programs and the development of chemical baits for control [J]. *American Entomologist*, 2001, 47 (3): 146–159.
- Xu YJ, Lu YY, Zeng L, *et al.* Attraction of several baits to workers of red imported fire ant [J]. *Chinese Bulletin of Entomology*, 2006, 43 (6): 856–857. [许益鏊, 陆永跃, 曾玲, 等. 几种饵料对红火蚁觅食的引诱作用 [J]. 昆虫知识, 2006, 43 (6): 856–857]
- Xu YJ, Lu YY, Zeng L, *et al.* Foraging behavior and recruitment of red imported fire ants in typical habitats in South China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 3: 855–861. [许益鏊, 陆永跃, 曾玲, 等. 华南地区典型生境中红火蚁觅食行为及工蚁召集规律 [J]. 生态学报, 2007, 3: 855–861]
- 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]
- Zhong PS, Zhao J, Zhang SS, *et al.* Attraction of baits on the worker ants of red imported fire [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2009, 36 (1): 22–25. [钟平生, 赵瑾, 张颂声, 等. 6 种饵料对红火蚁 *Solenopsis invicta* 引诱效果的测定 [J]. 安徽农业大学学报, 2009, 36 (1): 22–25]