



张惠菊, 陈立, 王文凯. 不同品级红火蚁体内生物碱含量的比较 [J]. 环境昆虫学报, 2018, 40 (2): 468–473.

不同品级红火蚁体内生物碱含量的比较

张惠菊^{1,2}, 陈立^{2*}, 王文凯^{1*}

(1. 长江大学农学院, 湖北荆州 434025; 2. 中国科学院动物研究所农业虫害鼠害综合治理研究国家重点实验室, 北京 100101)

摘要: 本文旨在比较不同有机溶剂, 不同浸泡时间对红火蚁体内生物碱的提取效率以及同巢蚁群中不同品级的红火蚁体内生物碱之间的差异。选用红火蚁整体浸泡法, 获取生物碱样品, 利用 GC-FID 技术进行定量分析。结果表明利用正己烷浸泡 1 h 即可获得红火蚁体内大部分的生物碱。同巢蚂蚁种群中, 雌性生殖蚁体内生物碱含量最高, 约为 82 μg/头, 而工蚁体内的生物碱含量与个体大小呈正相关。

关键词: 红火蚁; 毒液; 生物碱; 提取; 品级

中图分类号: Q968.1; S433

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2018) 02-0468-06

Comparison of venom alkaloids in different castes of individual ants of *Solenopsis invicta* Buren

ZHANG Hui-Ju^{1,2}, CHEN Li^{2*}, WANG Wen-Kai^{1*} (1. School of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou 434025, Hubei Province, China; 2. State Key Laboratory of Integrated Management of Pest Insects and Rodents, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: This study aimed to evaluate the effect of different organic solvents and extraction time on extraction efficiency of venom alkaloids from the fire ant, *Solenopsis invicta*. Meanwhile, the difference in alkaloids quantity from different castes of *S. invicta* was compared. The whole body soaking method with organic solvents was used to obtain venom alkaloids, and GC-FID technique was used for quantitative analysis of alkaloids. The results showed that the alkaloids in fire ant workers could be obtained by soaking the whole body in *n*-hexane for 1 h. Further, the content of venom alkaloids in alate ants was the highest, which was about 82 μg per ant. In worker ants, the alkaloids content was positively correlated with the worker size.

Key words: Red imported fire ant; venom alkaloids; extraction; caste

红火蚁 *Solenopsis invicta* Buren 具有明显的种群竞争优势, 可在入侵地区短时间内发展成为优势种, 造成当地生物多样性降低和生态单一化, 是世界范围内非常危险的入侵生物 (Vinson, 2013)。在美国, 入侵红火蚁迅速替代本地种热带火蚁 *S. geminata* (Fabricius), 并扩散至本地种南方火蚁

S. xyloni (MacCook)、金色火蚁 *S. aurea* Wheeler 和钝口火蚁 *S. amblychila* Wheeler 所在的干旱沙漠地区。在我国境内, 红火蚁入侵后迅速扩散, 正逐渐替代本地蚂蚁和早期入侵并已本土化的近缘种热带火蚁 (高燕等, 2011; 雷妍圆等, 2016)。

红火蚁具有很强的攻击性, 受到干扰时会螫

基金项目: 国家自然科学基金 (31772540)

作者简介: 张惠菊, 女, 1992 年生, 山西人, 硕士研究生, 研究方向为昆虫化学生态学, E-mail: 1543538186@qq.com

* 通讯作者 Author for correspondence, E-mail: w_wenkai@hotmail.com; chenli@ioz.ac.cn

收稿日期 Received: 2018-01-24; 接受日期 Accepted: 2018-02-05

刺人, 释放毒液, 人体被叮部位产生小脓包, 严重时会造成人过敏休克甚至死亡 (Stafford, 1996)。红火蚁的毒液由生物碱以及少量的蛋白质组成 (MacConnell *et al.*, 1971; Baer *et al.*, 1979)。这些吡啶生物碱有两个手性中心, 存在立体异构现象。其中顺式生物碱构型为 (2*R*, 6*S*), 反式构型为 (2*R*, 6*R*) (Leclercq *et al.*, 1994)。红火蚁毒液由毒腺产生, 储存在其毒囊中, 并最终通过尾部的毒针释放 (Callahan *et al.*, 1959)。每头工蚁每次通过毒针释放大约 0.66 nL 毒液, 约占其毒液总含量的 3.1% (Haight and Tschinkel, 2003)。

相关研究表明红火蚁的毒液成分与本地火蚁不同。热带火蚁、金色火蚁、南方火蚁工蚁的毒液成分主要是 *cis*-C11 和 *trans*-C11, 而且 *cis*-C11 的含量要明显高于 *trans*-C11 (Brand *et al.*, 1972; Blum *et al.*, 1973; Brand *et al.*, 1973b)。而红火蚁的工蚁的毒液成分主要是 *trans*-C13:1、*trans*-C13、*trans*-C15:1、*trans*-C15, 次要成分是 *trans*-C11、*trans*-C17:1 和 *trans*-C17 (MacConnell *et al.*, 1976; Blum *et al.*, 1992)。红火蚁的毒液成分与本地种火蚁的毒液成分显著不同, 这种差异可能是红火蚁种间竞争优势和成为入侵种的重要原因。

目前有 3 种常用的方法收集红火蚁的毒液。毛细管收集法由 Blum 等 (1958) 提出, 并广泛应用于制备毒液样品进行化学成分分析或用来进行生物测定 (MacConnell *et al.*, 1971, 1976; Blum, 1992; 马伏宁等, 2009)。另外可以通过解剖毒囊, 将毒囊直接放置于含有正己烷的小瓶中进行毒液的提取 (Storey *et al.*, 1991; Cruz-Lopez *et al.*, 2001; Haight and Tschinkel 2003; Chen *et al.*, 2009a, 2009b)。第三种常用的方法是红火蚁整体浸泡法, 该方法简单高效, 得到的样品可以直接用于分析。Liu 等 (2017) 证明整体浸泡法可以完全反应出红火蚁毒液的化学成分。

前人对红火蚁毒液的研究主要集中在生物碱的化学结构分析, 只有少数人定量分析了红火蚁体内生物碱成分的含量。Yu 等 (2014) 用 GC-FID 技术定量分析了红火蚁、黑火蚁和杂合体 3 种红火蚁体内生物碱的含量。但上述定量分析主要集中在蚂蚁群体的总含量, 而忽视了个体之间的差异。本实验的目的是确定提取溶剂及提取时间对红火蚁生物碱提取效率的影响, 并利用该方法提取同一巢蚂蚁蚁群中雌性生殖蚁以及大小不等的工蚁个体体内的毒液, 分析不同品级红火蚁个体

体内的生物碱组成及含量的不同。

1 材料与方法

1.1 材料

供试虫源: 实验所用红火蚁种群采自广东省华南农业大学校园。采集蚂蚁时, 选用 20 L 的塑料储物盒, 在内侧壁上涂上适量 Fluon, 防止蚂蚁逃跑。采集到的蚂蚁在室内搁置过夜后, 用“滴水法”将蚁群 (包括蚁后、生殖蚁、工蚁、蛹、卵、幼虫等) 从土壤中逼出, 转移至较小的储物盒, 令其建造人工蚁巢。以“水试管”提供清水和 20% 的蔗糖水, 每天每巢投放 2-3 头蟋蟀。

主要仪器: 美国 Agilent Technologies 公司 7890A 气相色谱仪 (GC)

1.2 方法

1.2.1 不同提取溶剂对红火蚁生物碱提取效率的影响

随机选取一巢红火蚁进行实验。选用正己烷、二氯甲烷、乙酸乙酯、丙酮、甲醇等五种不同极性的溶剂浸泡红火蚁, 筛选出最适合的提取溶剂。准确称取 0.5 g 红火蚁工蚁尸体, 用 2 mL 色谱级的以上五种溶剂浸泡 1 h, 用玻璃移液管取出浸提液, 加入少量无水硫酸钠进行干燥除水 6 h 后, 自然挥发至 2 mL。获得的样品稀释 3 倍后进行 GC-FID 分析。每种溶剂做四组重复。

1.2.2 不同浸泡时间对红火蚁生物碱提取效率的影响

随机选取一巢红火蚁, 准确称取 0.5 g 红火蚁工蚁, 用 2 mL 色谱级正己烷分别浸泡如下时间: 1/12, 1/4, 1/2, 1, 2, 6, 12, 24 和 48 h, 待到达设置的时间后, 用微量取样器从同一样品中吸取 50 μ L 提取液于 250 μ L 内插管中, 并加入 100 μ L 正己烷以获得 3 倍稀释溶液, 利用 GC-FID 进行分析。实验重复四次。

1.2.3 不同品级红火蚁体内生物碱的比较

从同一巢红火蚁中分别挑选雌性生殖蚁、大型工蚁、中型工蚁和小型工蚁各 10 头, 放置于冰盒中待其晕厥后, 用十万分之一的天平称量每头红火蚁的体重, 后将这些红火蚁单头用 1 mL 色谱级正己烷浸泡, 2 h 后取出蚂蚁, 得到的样品直接用 GC-FID 分析, 取出的蚂蚁在显微镜下测量头壳宽度。其中大型工蚁头壳宽度约为 1.32 - 1.40 mm, 体重为 4.69 ± 0.16 mg; 中型工蚁头壳

宽度约为 0.92 – 1.08 mm，体重为 1.95 ± 0.11 mg；小型工蚁头壳宽度约为 0.58 – 0.62 mm，体重为 0.75 ± 0.03 mg。

1.2.4 气相色谱条件设置

气相色谱条件: GC-FID 分析, 色谱柱为 HP-5MS 毛细管柱 (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm film thickness, Agilent Technologies), 进样量 1 μL, 无分流进样。进样口温度 270℃, 柱温箱温度为程序升温, 起始温度为 50℃, 保持 1 min, 以 5℃ /min 的速率升至 100℃, 保持 0 min, 然后以 10℃ /min 升至 240℃, 保持 10 min。检测器为火焰离子化检测器 (FID)。

1.3 生物碱的定量分析

1.3.1 标准曲线的建立

选择化学合成的 *cis*-C11 为标准化合物, 以 10 μg/μL 的标准样品为母液, 用色谱级正己烷把标准样品稀释成一系列浓度, 即 3.125 – 400 ng/μL 共 8 个浓度。所有浓度的样品都用 GC-FID 进行分析, 气相条件与上述一致, 进样量为 1 μL。根据样品浓度与峰面积的相关关系, 绘制标准曲线。

1.3.2 样品浓度的计算

GC-FID 定量分析时进样量是 1 μL, 参照 Liu 等 (2017) 确定红火蚁工蚁提取物中主要的反式生物碱成分, 并根据化合物的峰面积和标准曲线计算生物碱成分的浓度。

1.4 数据分析

标准样品的浓度与峰面积通过线性回归分析建立标准曲线。利用标准曲线计算出红火蚁样品中的生物碱浓度。数据分析采用 Excel 2010 软件。红火蚁生物碱含量差异 SPSS 21.0 软件系统进行方差分析, 采用 Tukey 多重比较检测差异显著性 ($P < 0.05$)

2 结果与分析

标准样品通过线性回归建立的标准曲线为 $Y = 8.0449X - 5.8948$ ($R^2 = 0.9987$), 说明 3.125 – 400 ng/μL 的浓度范围内线性关系非常好。

2.1 不同有机溶剂对生物碱的提取效率

当提取时间同为 1 h 时, 正己烷和二氯甲烷能够提取到的生物碱的含量最高, 分别达到 16477.05 ± 729.75 μg/g、 15985.75 ± 895.43 μg/g, 显著高于乙酸乙酯 (8283.12 ± 144.79 μg/g)、丙酮 (7059.94 ± 97.78 μg/g) 和甲醇 (5207.18 ± 457.35 μg/g) 的提取效率 (图 1)。

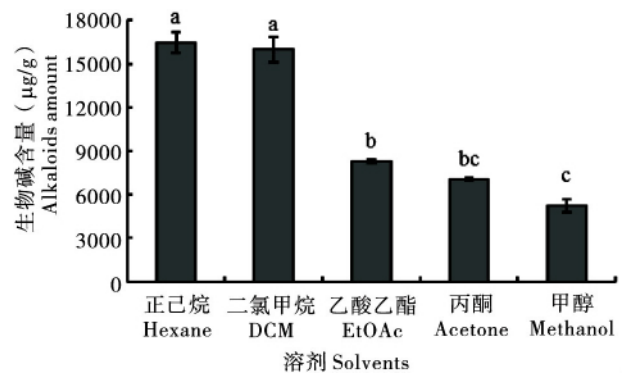


图 1 不同溶剂对红火蚁生物碱的提取效率

Fig. 1 The effect of different solvents on extraction efficiency of venom alkaloids from ant body

注: 图中数据为均值 ± 标准误。不同小写字母表示在 $P = 0.05$ 水平差异显著 (Tukey)。下同。Note: Values are mean ± SE. Values followed by different lower letters are significantly different at $P = 0.05$ according to Tukey tests. The same below.

2.2 不同浸泡时间对红火蚁工蚁生物碱的提取效率

当选用正己烷, 浸泡时间为 5 min 时, 提取液的浓度为 1.65 μg/μL; 随着时间的增加生物碱浓度逐渐升高。当浸泡时间延长至 1 h 时, 浓度升高至 2.68 μg/μL。而后随着时间增加, 生物碱浓度保持稳定, 基本不再变化, 说明利用正己烷浸泡可以快速提取出红火蚁体内的生物碱 (图 2)。

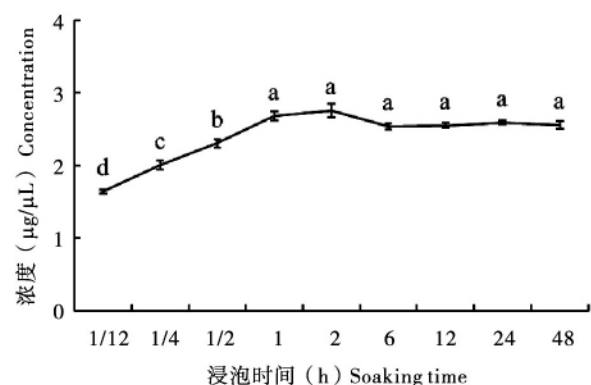


图 2 不同浸泡时间对红火蚁生物碱的提取效率

Fig. 2 The effect of extraction time on extraction efficiency of venom alkaloids from ant body

2.3 同一巢穴中不同品级的红火蚁体内生物碱含量

同一蚁巢中, 雌性生殖蚁体内的生物碱含量相对最高, 约为 82 μg/头, 工蚁体内生物碱含量随着工蚁个体的增大而增加, 大型工蚁体内生物

碱含量约为 $61 \mu\text{g}/\text{头}$ ，显著高于小型工蚁体内生物碱含量（约为 $12 \mu\text{g}/\text{头}$ ），中型工蚁的生物碱含量（约为 $26 \mu\text{g}/\text{头}$ ）介于两者之间（图 3）。

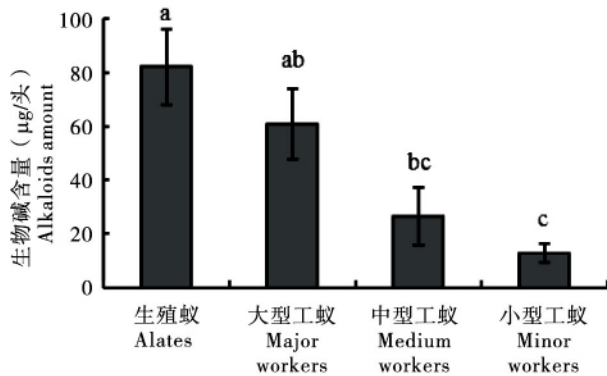


图 3 不同品级红火蚁生物碱的含量

Fig. 3 The amount of alkaloids in different castes of ants

2.4 不同大小的工蚁个体体内反式生物碱相对含量

由于红火蚁工蚁体内的生物碱主要是 *trans*-C13:1、*trans*-C13、*trans*-C15:1、*trans*-C15，而不同大小的工蚁体内的这四种生物碱的相对含量不同，因此比较了不同大小工蚁个体的 *trans*-C13/*trans*-C13:1 和 *trans*-C15/*trans*-C15:1，结果显示，*trans*-C13/*trans*-C13:1 和 *trans*-C15/*trans*-C15:1 这两个比例都与工蚁体型大小成正相关，即大型工蚁的 *trans*-C13/*trans*-C13:1 和 *trans*-C15/*trans*-C15:1 这两个值均显著大于小型工蚁（图 4）。

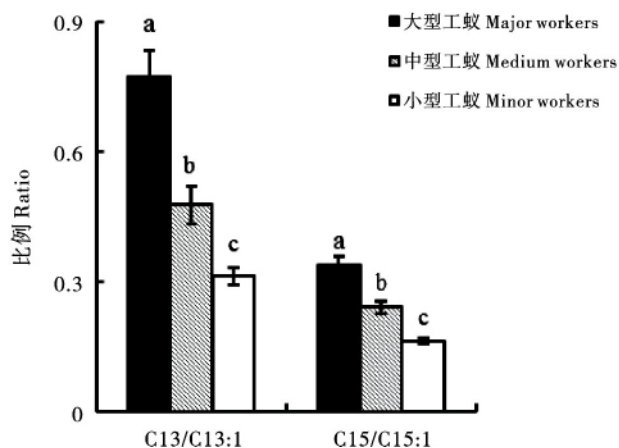


图 4 不同大小红火蚁工蚁反式饱和与不饱和生物碱含量的比例

Fig. 4 The ratio of amount (saturated to unsaturated alkaloids) for different worker sizes

3 结论与讨论

红火蚁毒液具有很强的毒力，红火蚁释放的毒液生物碱具有杀虫灭菌以及溶血活性等作用 (Blum *et al.*, 1958; Jouvenaz *et al.*, 1972)，因此在农业和医学等方面都具有潜在的利用价值。本实验证明利用正己烷整体浸泡红火蚁提取 1 h 即可获得体内大部分的生物碱，该方法简单快速高效，为生物碱的推广应用提供方便。

不同品级红火蚁个体体内生物碱含量都有较大的差异。雌性生殖蚁体内大部分是顺式和反式的 C11，而关于蚁后毒液的研究表明其体内毒液也是以顺式 C11 最多，其次是反式 C11 (马伏宁等, 2009; Chen *et al.*, 2012)。热带火蚁蚁后体内也是以顺式 C11 和反式 C11 为主，工蚁体内则有蚁后没有的长链的生物碱 (Chen *et al.*, 2012; Shi *et al.*, 2015)。红火蚁蚁后和雌性生殖蚁体内生物碱除了工蚁生物碱所具有的杀菌杀虫等毒理方面的作用外，还具有特殊的信息交流作用。这些毒液能够用于蚂蚁种群的建立，并且反映蚁后的发育程度以及鉴别蚁后的基因型 (Eliyahu *et al.*, 2011)。工蚁体内反式生物碱占绝对优势，且个体较大的工蚁体内生物碱含量平均值较高。定量分析室内饲养的红火蚁工蚁毒腺生物碱含量的动态变化 (刘先福等, 2015)，发现当红火蚁在室内饲养时，随着时间饲养时间的延长，蚁巢内的大部分个体较大的工蚁死亡较快，整个巢内生物碱含量大量减少。本实验研究结果显示，个体较大的工蚁体内生物碱含量较高，而当蚁巢大部分工蚁死亡后，使得整个巢内生物碱含量会降低，这一研究与刘先福等 (2015) 研究结果类似。

比较单后型和多后型红火蚁工蚁体内的生物碱 (Lai *et al.*, 2008)，发现多蚁后蚁巢中工蚁的 *trans*-C13/*trans*-C13:1 和 *trans*-C15/*trans*-C15:1 的比例显著低于单蚁后蚁巢，而本实验发现工蚁类群中个体较大的工蚁 *trans*-C13/*trans*-C13:1 和 *trans*-C15/*trans*-C15:1 两个比例显著高于个体较小的工蚁。且红火蚁体内的生物碱含量差异除了与个体大小相关外，与工蚁的年龄也有关系。中龄工蚁体内生物碱含量远高于老龄工蚁和幼龄工蚁 (Deslippe and Guo, 2000)。

研究表明，当热带火蚁工蚁与小型红火蚁相遇时，其对红火蚁的攻击指数/攻击强度显著高于

与大型红火蚁的攻击强度,但与中型的差异不显著,且热带火蚁面对大、中型红火蚁时,打斗激烈程度下降并在打斗中表现出选择性(雷妍圆等,2016)。这一现象某种程度上反映出各个物种间尽可能减少生存代价的生物本能。因此,在红火蚁种间的分工中,一般低龄的和个体较小的工蚁体内生物碱含量较低主要负责在巢内照顾幼虫,而个体较大/中型的工蚁体内生物碱含量相对较高则主要负责去巢外觅食(Mirenda and Vinson,1981)。据此,上述现象也进一步印证了红火蚁工蚁生物碱含量的差异与其在蚁群中的分工密切相关的猜想。

参考文献 (References)

- Baer H, Liu TY, Anderson MC, et al. Protein components of fire ant venom, *Solenopsis invicta* [J]. *Toxicon*, 1979, 17 (4): 397 - 405.
- Blum MS, Walker JR, Callahan PS, et al. Chemical, insecticidal, and antibiotic properties of fire ant venom [J]. *Science*, 1958, 128 (3319): 307 - 308.
- Blum MS, Fales HM, Leadbetter G, et al. A new dialkylpiperidine in the venom of the fire ant, *Solenopsis invicta* [J]. *Journal of Natural Toxins*, 1992, 1: 57 - 63.
- Brand JM, Blum MS, Fales HM, et al. Fire ant venoms: Comparative analyses of alkaloidal components [J]. *Toxicon*, 1972, 10 (3): 259 - 271.
- Brand JM, Blum MS, Ross HH. Biochemical evolution in fire ant venoms [J]. *Insect Biochemistry*, 1973a, 3 (9): 45 - 51.
- Brand JM, Blum MS, Barlin MR. Fire ant venoms: Intraspecific and interspecific variation among castes and individuals [J]. *Toxicon*, 1973b, 11 (4): 325 - 331.
- Callahan PS, Blum MS, Walker JR. Morphology and histology of the poison glands and sting of the imported fire ant, *Solenopsis saevissima v. richteri* Forel [J]. *Annals of the Entomological Society of America*, 1959, 52 (2): 573 - 590.
- Chen L, Lu YY, Hu QB, et al. Similarity in venom alkaloid chemistry of alate queens of imported fire ants: implication for hybridization between *Solenopsis richteri* and *S. invicta* in the southern United States [J]. *Chemistry and Biodiversity*, 2012, 9 (4): 702 - 713.
- Chen J, Cantrell CL, Shang HW, et al. Piperidine alkaloids from the poison gland of the red imported fire ant (Hymenoptera: Formicidae) [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009a, 57 (8): 3128 - 3133.
- Chen L, Sharma KR, Fadamiro HY. Fire ant venom alkaloids act as key attractants for the parasitic phorid fly, *Pseudacteon tricuspis* (Diptera: Phoridae) [J]. *Naturwissenschaften*, 2009b, 96 (12): 1421 - 1429.
- Cruz-Lopez L, Rojas JC, Cruz-Cordero RDL, et al. Behavioral and chemical analysis of venom gland secretion of queens of the ant, *Solenopsis geminata* [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2001, 27 (12): 2437 - 2445.
- Deslippe RJ, Guo YJ. Venom alkaloids of fire ants in relation to worker size and age [J]. *Toxicon*, 2000, 38 (2): 223 - 232.
- Eliyahu D, Ross K, Haight K, et al. 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 Y, Lv LH, He YR, et al. Interference competition between the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren and two native ant species (Hymenoptera: Formicidae) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2011, 54 (5): 602 - 608. [高燕, 吕利华, 何余容, 等. 红火蚁与两种本地蚂蚁间的干扰竞争 [J]. *昆虫学报*, 2011, 54 (5): 602 - 608]
- Guan D, Liao XL, Chen L. Comparative analysis of venomous alkaloids in workers of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae), from China and the United States [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2013, 56 (4): 365 - 371. [官迪, 廖晓兰, 陈立. 中国和美国红火蚁毒腺生物碱组分的比较分析 [J]. *昆虫学报*, 2013, 56 (4): 365 - 371]
- Haight KL, Tschinkel WR. Patterns of venom synthesis and use in the fire ant, *Solenopsis invicta* [J]. *Toxicon*, 2003, 42 (6): 673 - 682.
- Jouvenaz DP, Blum MS, MacConnell JG. Antibacterial activity of venom alkaloids from the imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren [J]. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 1972, 2 (4): 291 - 293.
- Lai LC, Huang WJ. Venom alkaloids of monogyne and polygyne forms of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta*, in Taiwan [J]. *Insectes Sociaux*, 2008, 55 (4): 443 - 449.
- Leclercq S, Thirionet I, Broeders F, et al. Absolute configuration of the solenopsins, venom alkaloids of the fire ants [J]. *Tetrahedron*, 1994, 50 (28): 8465 - 8478.
- Liu HW, Lu YY, Wang WK, et al. Whole body solvent soak gives representative venom alkaloid profile from *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) workers [J]. *Florida Entomologist*, 2017, 100 (3): 522 - 527.
- Liu XF, Chen L, Li JK. Dynamic analysis of venomous alkaloids in workers of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) maintained in the laboratory [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2015, 58 (1): 22 - 27. [刘先福, 陈立, 李俊凯. 室内饲养的红火蚁工蚁毒腺生物碱含量动态分析 [J]. *昆虫学报*, 2015, 58 (1): 22 - 27]
- Lei YY, Lv LH, He YR, et al. Interference competition between two invasive fire ants [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2016, 53 (6): 1369 - 1377. [雷妍圆, 吕利华, 何余容, 等. 红火蚁与热带火蚁间的干扰竞争 [J]. *应用昆虫学报*, 2016, 53 (6): 1369 - 1377]
- MacConnell JG, Blum MS, Fales HM. The chemistry of fire ant venom [J]. *Tetrahedron*, 1971, 27 (6): 1129 - 1139.
- MacConnell JG, Blum MS, Buren WF, et al. Fire ant venoms: chemotaxonomic correlations with alkaloidal compositions [J]. *Toxicon*, 1976, 14 (1): 69 - 78.
- Ma FN, Zeng XN, Pan DQ. Comparison of venom alkaloids in worker

- ants and queen of *Solenopsis invicta* Burns [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin* ,2009 ,25 (17): 57 - 61. [马伏宁, 曾鑫年, 潘达强. 多后型红火蚁工蚁和蚁后毒液生物碱成分的比较 [J]. *中国农学通报* ,2009 ,25 (17): 57 - 61]
- Mirenda JT ,Vinson SB. Division of labour and specification of castes in the red imported fire ant , *Solenopsis invicta* [J]. *Animal Behaviour* ,1981 ,29 (2): 410 - 420.
- Shi QH , Hu L , Wang WK , *et al.* Workers and alate queens of *Solenopsis geminata* share qualitatively similar but quantitatively different venom alkaloid chemistry [J]. *Frontiers in Ecology and Evolution* ,2015 ,3: 76.
- Stafford CT. Hypersensitivity to fire ant venom [J]. *Annals of Allergy Asthma & Immunology* ,1996 ,77 (2): 87 - 95.
- Storey GK ,Meer RKV ,Boucias DG , *et al.* Effect of fire ant (*Solenopsis invicta*) venom alkaloids on the in vitro germination and development of selected entomogenous fungi [J]. *Journal of Invertebrate Pathology* ,1991 ,58 (1): 88 - 95.
- Vinson SB. Impact of the invasion of the imported fire ant [J]. *Insect Science* ,2013 ,20 (4): 439 - 455.
- Yu YT , Wei HY , Fadamiro HY , *et al.* Quantitative analysis of alkaloidal constituents in imported fire ants by gas chromatography [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* ,2014 ,62 (25): 5907 - 5915.