

红火蚁入侵对人为干扰区蚂蚁群落结构及多样性的影响^{*}

齐国君^{1**} 黄永峰¹ 岑伊静² 吕利华^{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. 华南农业大学农学院, 广州 510642)

摘 要 【目的】研究红火蚁 *Solenopsis invicta* Buren 入侵人为干扰区域后对本地蚂蚁群落建立及物种多样性的影响, 为有效控制红火蚁进一步扩散蔓延提供科学依据。【方法】以广州市花都区花东镇保良村安置区为典型案例, 调查研究了安置区外围(非人为干扰区)安置区(人为干扰区)内的楼房区、草坪绿化地、荒地 3 种生境的蚂蚁种类和数量, 分析其群落结构及多样性指数。【结果】(1)安置区外围诱集到 25 种蚂蚁, 以黑头酸臭蚁 *Tapinoma melanocephalum* Fabricius、褐大头蚁 *Pheidole megacephala* Fabricius 为优势种, 而在安置区内仅诱集到 13 种, 红火蚁占绝对优势; 红火蚁入侵定殖显著降低了安置区内蚂蚁种群的多样性、均匀度和丰富度, 而优势度及优势集中性指数却显著升高, 其对安置区外围的农业生态系统影响较小。(2)安置区内草坪绿化地、荒地生境中红火蚁的比例占 90%以上, 而在楼房区中红火蚁的比例仅为 29.11%; 红火蚁在草坪绿化地、荒地的优势种占绝对优势, 其优势度指数、优势集中性指数与楼房区差异极显著; 在安置区内, 红火蚁在人类极少活动的荒地发生较重, 偶尔活动的草坪区发生次之, 经常活动的楼房区极少发生。【结论】入侵红火蚁与本地蚂蚁在人为干扰区共同定殖时, 红火蚁入侵显著降低了人为干扰区内的蚂蚁群落多样性, 但其红火蚁的发生程度与人类日常活动呈反比。

关键词 红火蚁, 人为干扰区, 安置区, 群落结构, 多样性

Effects of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren, on the structure and diversity of the ant community in a human disturbed area

QI Guo-Jun^{1**} HUANG Yong-Feng¹ CEN Yi-Jing² LÜ Li-Hua^{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 Agriculture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract [Objectives] In order to provide a scientific basis for better control of the fire ant, the effects of *Solenopsis invicta* Buren on the structure and diversity of an ant community were studied in a human disturbed area. [Methods] Ant species diversity and abundance were investigated in an outside resettlement area (non human disturbed area) and an inside resettlement area (human disturbed area, including dwelling area, grass lawn and barren land), in Baoliang Village, Huadong Town, Huadu District, Guangzhou City, and the community structure dominant species, species diversity, evenness and richness index of the ant community determined. [Results] (1) 25 ant species were collected in the outside resettlement area where *Tapinoma melanocephalum* Fabricius and *Pheidole megacephala* Fabricius were the dominant species. 13 ant species were collected in the inside resettlement area where *S. invicta* was the dominant species. Colonization by *S. invicta*

* 资助项目 Supported projects: “十二五”国家科技支撑计划(2015BAD08B02); 科技部科技伙伴计划(KY201402015); 广州市科技计划项目(2013J4500032); 国家国际科技合作项目(2011DFB30040)

**第一作者 First author, E-mail: super_qi@163.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: lhlu@gdppri.com

收稿日期 Received: 2015-11-02, 接受日期 Accepted: 2015-11-12

significantly reduced the diversity, evenness and richness of the ant community within the resettlement area, while the dominance index and the dominance concentration index of the ant community significantly increased compared to that of the community in the outside resettlement area, where *S. invicta* had a limited impact on the agricultural ecosystem. (2) The proportion of *S. invicta* in the ant community was more than 90% in grass lawn and barren land, but only 29.11% in dwelling areas. *S. invicta* was the dominant species in grass lawns and barren land, and there were significant differences in the dominance index and dominance concentration index between ant communities in grass lawn and barren land and those in dwelling areas. *S. invicta* was most abundant in scarcely-disturbed barren land, followed by occasionally disturbing grass lawn, but was only lightly distributed in frequently disturbing dwelling areas. **[Conclusion]** During simultaneous colonization by invasive and native ant species, the invasive ant *S. invicta* significantly reduced the diversity of the ant community in a human disturbed area. The occurrence of *S. invicta* was inversely proportional to the level of disturbance caused by daily human activity.

Key words *Solenopsis invicta* Buren, human disturbed area, resettlement area, community structure, diversity

红火蚁 *Solenopsis invicta* Buren 是世界上最危险的 100 种入侵有害生物之一 (Lowe *et al.*, 2000)。2004 年首次在广东省吴川市发现红火蚁入侵 (曾玲等, 2005), 此后在香港、澳门、湖南、广西、福建、江西、海南、四川、云南、重庆等省市相继出现红火蚁疫情 (Wang *et al.*, 2013; 陆永跃, 2014), 红火蚁已在我国南方多省呈现出难以遏制的蔓延势头, 并造成了严重的经济损失和生态灾难。

红火蚁以其极大的生态优势: 食物范围广、适宜温区宽、种群数量大、自然传播扩散能力强、速度快等 (Markin *et al.*, 1974; Cokendolpher and Phillips, 1990; Vinson, 1997), 对入侵地生态环境造成极大的破坏。国外已有研究表明红火蚁对北美地区多种脊椎动物和无脊椎动物及其生境产生负面影响, 入侵直接或间接导致了物种多样性的降低 (Hoffmann *et al.*, 1999; Sanders *et al.*, 2001; Deblauwe and Dekoninck, 2007)。近年来, 我国学者针对农田、果园、荒地、草坪、桑园等生境红火蚁对蚂蚁或动物群落多样性的影响开展了大量的研究, 研究表明红火蚁入侵不仅影响农业生产, 对人畜健康造成极大威胁, 而且通过资源竞争和干扰竞争与当地蚂蚁争夺食物和生态位, 使本地蚂蚁群落的多样性、均匀度和优势度均发生剧烈变化, 排挤或逐渐取代本地蚂蚁, 严重破坏当地生态系统平衡 (李宁东等, 2006; 沈鹏等, 2007; 吴碧球等, 2008; 宋侦东等, 2009, 2010; 许益鏊等, 2009; 吴碧球等,

2010; 席银宝等, 2010; 张波等, 2012)。以上研究大都是在自然条件下探讨入侵蚂蚁与本地蚂蚁的竞争机理, 而较少涉及到人为日常活动对红火蚁入侵与定殖的影响, 尤其是从蚂蚁群落及多样性的角度来分析该类影响。

花都区花东镇保良村安置区是新开发的有配套设施的住宅区, 由新增绿化工程苗木与草皮携带进来的红火蚁已在该新开发的部分区域定殖成功, 并与本地蚂蚁混合发生。以花都安置区作为典型事例, 研究红火蚁入侵新区域后对当地蚂蚁群落及物种多样性的影响, 探讨人为干扰程度对红火蚁扩散及分布的影响, 为有效控制红火蚁在新入侵区进一步扩散、降低绿化工程入侵红火蚁的防治成本提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

调查在广州市花都区花东镇保良村安置区及周边区域进行, 安置区内南北向长约 760 m, 东西向约 745 m, 其中 2/3 的面积被开发为楼房、草坪绿化地, 剩下 1/3 的面积为荒地。在安置区内适合红火蚁繁殖的生境有草坪绿化地、荒地、楼房前绿地 (楼房区), 安置区外围为荔枝园或荔枝园与小型农场混合的农业生态系统区, 人为活动较少。

1.2 试验小区设计

安置区外围分别选取东、南、西、北四个方位, 每个方位设计两个点, 东面 D1、D2 设在荔

枝园,南面 N1、N2 设在荔枝园和菜地,西面 X1、X2 设在村庄和荔枝园,北面 B1、B2 设在养殖场与荔枝园混合区域。安置区内选取楼房区、草坪绿化地、荒地 3 种生境,其中楼房区人为活动程度最大,草坪绿化地次之,荒地最小。楼房区的草坪绿化地或菜地设 4 个取样点,分别为 L1、L2、L3、L4;荒地于楼房的外围或道路旁,为长有杂草的闲置地,设 4 个取样点分别为 K1、K2、K3、K4;草坪绿化地为道路两旁的绿地,设两个取样点分别为 G1、G2。

1.3 调查方法

于 2008 年 5 月—2009 年 4 月期间,每月调查 1 次,调查时间选择晴天、温度适宜的天气条件。采用诱饵诱集法调查安置外围、安置区内楼房区、草坪绿化地、荒地的蚂蚁种类和数量,具体方法参照刘杰等(2006)的诱集方法。蚂蚁的种类鉴定参考吴坚和王常禄(1995)编著的《中国蚂蚁》的分类系统。采用步行目视法记录安置区内 3 种生境单位面积内红火蚁有效蚁巢的数量,具体方法参照刘杰等(2006)的有效蚁丘调查方法。

1.4 数据分析方法

采用 Simpson 优势度公式、Shannon-Wiener 多样性公式、Pielou 均匀度公式、Margalef 丰富度公式分别计算每个小区蚂蚁类群的优势度指数、优势集中性指数、多样性指数、均匀度指数、丰富度指数,具体计算公式参见马克平的公式(马克平,1994)。上述数据均用 DPS 软件进行数据统计分析(唐启义和冯明光,2002)。

2 结果与分析

2.1 蚂蚁群落结构分析

2.1.1 安置区内外蚂蚁群落结构 利用诱集法对安置区外围、安置区内 3 种生境的蚂蚁进行采样调查,安置区外围共诱集到 28 901 头蚂蚁,分属于臭蚁亚科、切叶蚁亚科、蚁亚科、猛蚁亚科 4 个亚科的 25 种蚂蚁,其中黑头酸臭蚁 *Tapinoma melanocephalum* Fabricius、褐大头蚁 *Pheidole*

megacephala Fabricius 为蚂蚁群落的优势种,分别占 41.49%和 21.37%,而红火蚁个体数所占比例较低,仅为 1.35%(表 1);而在重新建造的安置区内的楼房区、草坪绿化地、荒地 3 种生境中共诱集到 69 968 头蚂蚁,分属于切叶蚁亚科、蚁亚科、臭蚁亚科 3 个亚科的 13 种蚂蚁,其中红火蚁为该区域内蚂蚁群落的优势种,比例高达 92.37%(表 1)。虽然安置区内比安置区外围诱集的蚂蚁数量多,但蚂蚁种类却比安置区外围少 12 种,且红火蚁在安置区内占绝对优势,可见,在人为建筑的区域,红火蚁一旦入侵便很快在该区域内成功定殖,并显著降低了安置区内蚂蚁的种类。

2.1.2 安置区内 3 种生境的蚂蚁群落结构 利用诱集法对安置区内楼房区、荒地和草坪绿化地 3 种生境蚂蚁进行采样调查,3 种生境诱集到的蚂蚁数量分别为 2 037 头、36 342 头和 31 589 头,均属于臭蚁亚科、切叶蚁亚科、蚁亚科 3 个亚科,种类分别为 8 种、8 种及 10 种。楼房区的优势种为亮红大头蚁 *Pheidole fervida* Smith 和红火蚁,分别占 35.98%、29.11%,而荒地和草坪绿化地的优势种只有红火蚁 1 种,所占比例高达 96.03%和 92.24%。对比红火蚁在安置区内 3 种生境所占的比例可见,红火蚁在草坪绿化地、荒地中占绝对优势(90%以上),而在楼房区中的比例低于 30%,远远低于荒地和草坪绿化地的比例(表 2)。

2.2 蚂蚁群落多样性分析

2.2.1 安置区内外蚂蚁群落多样性指数 对安置区内外蚂蚁群落的优势度指数、优势集中性指数、多样性指数、均匀性指数、丰富度指数进行比较分析,经 *t*-检验后,安置区内蚂蚁群落的优势度指数、优势集中性指数显著高于安置区外围,而多样性指数、均匀性指数、丰富度指数却显著低于安置区外围(表 3)。可见,红火蚁入侵安置区内外,严重影响了安置区内蚂蚁种群的群落多样性,显著降低了该区域蚂蚁种群的多样性、均匀度和丰富度,而红火蚁的优势度及优势集中性指数却显著升高,其入侵对安置区外围的农业生态系统影响较小。

表 1 安置区外围和安置区内的蚂蚁群落结构
Table 1 Community structure of the ants in the outside and inside resettlement area

蚂蚁种类 Ant species	安置区外围 Outside resettlement area		安置区内 Inside resettlement area	
	数量 Number	比例 (%) Proportion	数量 Number	比例 (%) Proportion
臭蚁亚科 Dolichoderinae				
黑头酸臭蚁 <i>Tapinoma melanocephalum</i> Fabricius	11 992	41.49	312	0.45
切叶蚁亚科 Myrmicinae				
褐大头蚁 <i>Pheidole megacephala</i> Fabricius	6 176	21.37	2	0.00
中华小家蚁 <i>Monomorium chinense</i> Santschi	2 550	8.82	385	0.55
亮红大头蚁 <i>Pheidole fervida</i> Smith	2 057	7.12	1 807	2.58
印度大头蚁 <i>Pheidole indica</i> Mayr	1 052	3.64	—	—
宽结大头蚁 <i>Pheidole nodus</i> Smith	850	2.94	—	—
皮氏大头蚁 <i>Pheidole pili</i> Santschi	845	2.92	—	—
双隆骨铺道蚁 <i>Tetramorium bicarinatum</i> Nylander	601	2.08	—	—
红火蚁 <i>Solenopsis invicta</i> Buren	390	1.35	64 630	92.37
伊大头蚁 <i>Pheidole yeensis</i> Forel	372	1.29	—	—
小家蚁 <i>Monomorium pharaonis</i> Linnaeus	198	0.69	282	0.4
凹大头蚁 <i>Pheidole sulcaticeps</i> Roger	80	0.28	5	0.01
黑色铺道蚁 <i>Tetramorium crepum</i> Wang et Wu	77	0.27	—	—
黑褐举腹蚁 <i>Crematogaster rogenhoferi</i> Mayr	75	0.26	3	0.00
史氏铺道蚁 <i>Tetramorium smithi</i> Mayr	21	0.07	—	—
裸心结蚁 <i>Cardiocondyla nuda</i> Mayr	12	0.04	126	0.18
比罗举腹蚁 <i>Crematogaster biroi</i> Mayr	10	0.03	—	—
长节大头蚁 <i>Pheidole fervens</i> Smith	7	0.02	—	—
蚁亚科 Formicinae				
布立毛蚁 <i>Paratrechina bourbonica</i> Forel	859	2.97	950	1.36
亮立毛蚁 <i>Paratrechina vividula</i> Nylander	457	1.58	1 227	1.75
安宁弓背蚁 <i>Camponotus anningensis</i> Wu et Wang	190	0.66	—	—
哀弓背蚁 <i>Camponotus dolendus</i> Forel	15	0.05	239	0.34
长角立毛蚁 <i>Paratrechina longicornis</i> Latreille	7	0.02	—	—
猛蚁亚科 Ponerinae				
横纹齿猛蚁 <i>Odontoponera transversa</i> Smith	5	0.02	—	—
聚纹双刺猛蚁 <i>Diacamma rugosum</i> Le Guillou	3	0.01	—	—

2.2.2 安置区内 3 种生境的蚂蚁群落多样性指数
对安置区 3 种生境蚂蚁群落的优势度指数、优势集中性指数、多样性指数、均匀性指数、丰富度指数进行比较分析，安置区内草坪绿化地、

荒地 & 楼房区之间的优势度指数、优势集中性指数差异显著，草坪绿化地、荒地的优势度指数、优势集中性指数均在 0.90 左右，而楼房区的仅在 0.56~0.59；草坪绿化地、荒地 & 楼房区之间

表 2 安置区内不同生境的蚂蚁群落结构

Table 2 Community structure of the ants in different habitats of inside resettlement area

蚂蚁种类 Ant species	楼房区 Dwelling area		荒地 Barren land		草坪绿化地 Green lawn	
	数量 Number	比例(%) Proportion	数量 Number	比例(%) Proportion	数量 Number	比例(%) Proportion
切叶蚁亚科 Myrmicinae						
亮红大头蚁 <i>Pheidole fervida</i> Smith	733	35.98	—	—	1074	3.4
红火蚁 <i>Solenopsis invicta</i> Buren	593	29.11	34 898	96.03	29 139	92.24
中华小家蚁 <i>Monomorium chinense</i> Santschi	113	5.55	255	0.7	17	0.05
褐大头蚁 <i>Pheidole megacephala</i> Fabricius	2	0.1	—	—	—	—
裸心结蚁 <i>Cardiocondyla nuda</i> Mayr	1	0.05	14	0.04	111	0.35
小家蚁 <i>Monomorium pharaonis</i> Linnaeus	—	—	257	0.71	25	0.08
凹大头蚁 <i>Pheidole sulcaticeps</i> Roger	—	—	—	—	5	0.02
比罗举腹蚁 <i>Crematogaster biroi</i> Mayr	—	—	—	—	3	0.01
蚁亚科 Formicinae						
亮立毛蚁 <i>Paratrechina vividula</i> Nylander	253	12.42	149	0.41	825	2.61
布立毛蚁 <i>Paratrechina bourbonica</i> Forel	154	7.56	413	1.14	383	1.21
哀弓背蚁 <i>Camponotus dolendus</i> Forel	—	—	239	0.66	—	—
臭蚁亚科 Dolichoderinae						
黑头酸臭蚁 <i>Tapinoma melanocephalum</i> Fabricius	188	9.23	117	0.32	7	0.02

表 3 安置区外围和安置区内的蚂蚁群落指数

Table 3 Community indices of the ants in outside and inside resettlement area

类型 Type	优势度指数 Dominant index	优势集中性指数 Dominant concentration index	多样性指数 Diversity index	均匀度指数 Evenness index	丰富度指数 Richness index
安置区外围 Outside resettlement area	0.64 ± 0.03	0.55 ± 0.04	0.67 ± 0.08	0.53 ± 0.05	0.62 ± 0.04
安置区内 Inside resettlement area	0.82 ± 0.03	0.78 ± 0.03	0.19 ± 0.04	0.18 ± 0.03	0.40 ± 0.03
<i>t</i> -检验 <i>t</i> -test	<i>t</i> = - 3.83 <i>P</i> < 0.01	<i>t</i> = - 4.99 <i>P</i> < 0.01	<i>t</i> = 5.49 <i>P</i> < 0.01	<i>t</i> = 5.87 <i>P</i> < 0.01	<i>t</i> = 4.33 <i>P</i> < 0.01

的多样性指数在 0.12~0.27，均匀性指数在 0.12~0.23，差异均不显著；而草坪绿化地的丰富度指数显著高于楼房区和荒地，其中荒地的丰富度指数最小，为 0.28 ± 0.03 （表 4）。可见，红火蚁在安置区内草坪绿化地、荒地的优势种占绝对优势，其他蚂蚁的种群数量远远低于红火蚁的种群数量，这与楼房区的差异极显著。

2.3 安置区内 3 种生境的红火蚁的蚁巢密度变化

对安置区内 3 种生境类型的红火蚁蚁巢进

行调查，楼房区由于受人为活动干扰较多，红火蚁建巢机率低，仅出现过一次，其平均蚁巢密度为 (0.11 ± 0.11) 个/100 m²，而人为干扰较少的草坪绿化地、荒地的蚁巢密度相对较高，分别为 (0.36 ± 0.04) 个/100 m²、 (0.51 ± 0.07) 个/100 m²，与楼房区的差异极显著，可见，在安置区内，红火蚁在人类极少活动的荒地发生较重，偶尔活动的草坪区发生次之，经常活动的楼房区极少发生。

表 4 安置区内不同生境的蚂蚁群落指数
Table 4 Community indices of the ants in different habitats of inside resettlement area

生境类型 Habitats type	优势度指数 Dominant index	优势集中性指数 Dominant concentration index	多样性指数 Diversity index	均匀度指数 Evenness index	丰富度指数 Richness index
楼房区 Dwelling area	0.59±0.09a	0.56±0.08a	0.19±0.05a	0.23±0.05a	0.38±0.07a
草坪绿化地 Green lawn	0.92±0.03b	0.87±0.04b	0.27±0.08a	0.19±0.05a	0.54±0.03b
荒地 Barren land	0.94±0.03b	0.91±0.04b	0.12±0.05a	0.12±0.04a	0.28±0.03a

同列数据后标有不同小写字母者表示经方差分析在 0.01 水平上差异显著。
Data followed by different letters in the same column indicate significant difference at 0.01 level.

3 讨论

红火蚁的入侵会降低入侵区域的蚂蚁种类、蚂蚁群落的多样性、丰富度及均匀度等,优势度反而会明显增大(沈鹏等,2007;宋侦东等,2010;吴碧球等,2010;席银宝等,2010),但对于红火蚁与本地蚂蚁在人为干扰区域共同定殖时,二者如何在相互竞争中定殖的研究较少。本研究选取花都区花东镇保良村安置区作为典型个例,调查发现安置区内 3 种生境共诱集到 13 种蚂蚁,长期优势种只有红火蚁 1 种,比例高达 90%以上,而安置区外围以荔科技园农业生态系统为主,共诱集到 25 种蚂蚁,优势种为本地蚂蚁(黑头酸臭蚁、褐大头蚁),红火蚁所占比例仅为 1.35%。可见,红火蚁在安置区比本地蚂蚁建立种群快,且在数量上占主导地位,这是由于红火蚁的竞争优势明显强于本地蚂蚁(吴碧球等,2010;高燕等,2011),许多本地蚂蚁因红火蚁不同寻常的毒液、强烈的攻击性而消失(Obin and Vander Meer,1985;Solley *et al.*,2002;Greenberg *et al.*,2008)。而在安置区外围的生态系统环境荫蔽、极少受到人为干扰,红火蚁难以在短期内成功定殖并建立稳定的种群结构,这是由于红火蚁倾向于在阳光充足、荫蔽度较小的开阔生境中定殖(Tschinkel,1987;吴碧球等,2010)。

红火蚁具有较强的环境适应能力,但在不同生境类型的发生程度却有明显不同(Wojcik *et al.*,2001;吴碧球等,2008;许益鏊等,2009)。荒坡、荒地、田埂等受到干扰较少的地点红火蚁

发生密度高,而人为活动较频繁的水稻田、菜田、花生地、红薯地等红火蚁发生密度较低(李宁东等,2006)。本研究安置区内的调查结果表明,红火蚁在草坪绿化地、荒地的蚂蚁群落中占绝对优势(90%以上),而在楼房区中的比例低于 30%;且楼房区、草坪绿化地、荒地的蚁巢密度也存在较大差别。可见,红火蚁在新入侵区域的定殖、种群发展与分布与人类日常活动密切相关,人类日常活动越频繁的区域(如住宅区),红火蚁受到的人为干扰越大,红火蚁发生越轻,而人类日常活动越少的区域(如荒地),红火蚁发生情况最为严重。这可能是由于荒地受人为干扰的程度最低,能提供较稳定的食物来源,红火蚁容易形成固定的蚁巢(Tschinkel,1987;吴碧球等,2008),草坪绿化地大部分区域靠近楼房区,受人为干扰程度比荒地要高,红火蚁蚁巢分布不均匀(宋侦东等,2010),偏向于离居民楼远的区域;楼房区人为干扰程度最大,红火蚁建巢机率较低。

红火蚁的传播扩散包括自然扩散和人为传播,自然扩散主要是婚飞、随洪水流动或搬巢而作近距离扩散,而人为传播是红火蚁远距离扩散的主要途径(Vinson,1997;李慎磊等,2014),研究表明在美国红火蚁的扩散与人类的活动密切相关,其快速扩张主要依赖草皮和苗木等调运,扩散速度达到 200 km/年(Cokendolpher and Phillips,1989;Callcott and Collins,1996)。红火蚁能否在新入侵地定殖成功,不仅与其特殊的生物学和生态学特点密切相关,还受水分、食物、阳光、温湿度等环境因子的影响(Vinson,1997)。

本研究仅就红火蚁入侵新区对蚂蚁群落结构及多样性的影响开展研究,通过安置区典型案例初步探讨了人为干扰程度对红火蚁扩散及分布的影响,而其他不同人为干扰程度的生境对红火蚁入侵定殖、扩散、分布的影响有待进一步研究。

参考文献 (References)

- Callcott AM, Collins HL, 1996. Invasion and range expansion of imported fire ant (Hymenoptera: Formicidae) in North America from 1918–1995. *Florida Entomologist*, 79(2): 240–251.
- Cokendolpher JC, Phillips SA, 1989. Rate of spread of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) in Texas. *Southwestern Naturalist*, 34(3): 443–449.
- Cokendolpher JC, Phillips SA, 1990. Critical thermal limits and locomotor activity of the red imported fire ant (Hymenoptera: Formicidae). *Environmental Entomology*, 19(4): 878–881.
- Deblauwe I, Dekoninck W, 2007. Diversity and distribution of ground-dwelling ants in a lowland rainforest in southeast Cameroon. *Insectes Sociaux*, 54(4): 334–342.
- Gao Y, Lu LH, He YR, Qi GJ, Zhang JQ, 2011. Interference competition between the red imported fire ant (*Solenopsis invicta* Buren) and two native ant species (Hymenoptera: Formicidae). *Acta Entomologica Sinica*, 54(5): 602–608. [高燕, 吕利华, 何余容, 齐国君, 张金强, 2011. 红火蚁与两种本地蚂蚁间的干扰竞争. *昆虫学报*, 54(5): 602–608.]
- Greenberg L, Kabashima JN, Allison CJ, Rust MK, Klotz JH, Hurvois JP, Paine TD, 2008. Lethality of red imported fire ant venom to Argentine ants and other ant species. *Annals of the Entomological Society of America*, 101(6): 1162–1168.
- Hoffmann BD, Andersen AN, Hill GJE, 1999. Impact of an introduced ant on native rain forest invertebrates: *Pheidole megacephala* in monsoonal Australia. *Oecologia*, 120(4): 595–604.
- Li ND, Lu YY, Zeng L, Liang GW, Xu YJ, 2006. Study on types of environment, spatial distribution and sampling of red imported fire ant *Solenopsis invicta* Buren active mounds in Wuchuan, Guangdong Province. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 25(1): 31–36. [李宁东, 陆永跃, 曾玲, 梁广文, 许益鏖, 2006. 广东省吴川红火蚁生境类型、空间分布和抽样技术的研究. *华中农业大学学报*, 25(1): 31–36.]
- Li SL, Zeng L, Xu YJ, Lu YY, 2014. Infestation of red imported fire ants (*Solenopsis invicta*) at turf plantations and lawns in Guangdong. *Journal of Biosafety*, 23(2): 103–106. [李慎磊, 曾玲, 许益鏖, 陆永跃, 2014. 广东省草皮种植场和城市草坪红火蚁发生为害程度调查. *生物安全学报*, 23(2): 103–106.]
- Liu J, Lu LH, Chen HY, Feng X, Zhou XM, He YR, 2006. Red imported fire ant control with fipronil mound drenches and its impact in ant community. *Guangdong Agricultural Sciences*, 33(5): 24–27. [刘杰, 吕利华, 陈焕瑜, 冯夏, 周小毛, 何余容, 2006. 灌巢对红火蚁的防效评价及对蚂蚁群落的影响. *广东农业科学*, 33(5): 24–27.]
- Lowe S, Browne M, Boudjelas S, De Poorter M, 2000. 100 of the World's Worst Invasive Alien Species. A Selection from the Global Invasive Species Database. Published by The Invasive Species Specialist Group (ISSG) a specialist group of the Species Survival Commission (SSC) of the World Conservation Union (IUCN). 12. First published as special list-out in Aliens 12, December 2000. Updated and reprinted version: November 2004. Electronic version available at: www.issg.org/booklet.pdf.
- Lu YY, 2014. Long-distance spreading speed and trend prediction of red imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren, in mainland China. *Guangdong Agricultural Sciences*, 41(10): 70–72. [陆永跃, 2014. 中国大陆红火蚁远距离传播速度探讨和趋势预测. *广东农业科学*, 41(10): 70–72.]
- Ma KP, 1994. Measurement of biodiversity. Qian YQ, Ma KP (eds.). *Principle and Methods of Biodiversity Studies*. Beijing: Chinese Science and Technological Press. 141–165. [马克平, 1994. 生物群落多样性的测度方法 // 钱迎倩, 马克平主编. *生物多样性研究的原理与方法*. 北京: 中国科学技术出版社. 141–165.]
- Markin GP, O'Neil J, Dillier JH, 1974. Regional variation in the seasonal activity of the imported fire ant, *Solenopsis saevissima* richteri. *Environmental Entomology*, 3(3): 446–452.
- Obin MS, Vander Meer RK, 1985. Gaster flagging by fire ants (*Solenopsis* spp.): functional significance of venom dispersal behavior. *Journal of Chemical Ecology*, 11 (12): 1757–1768.
- Sanders NJ, Barton KE, Gordon DM, 2001. Long-term dynamics of the distribution of the invasive Argentine ant, *Linepithema humile*, and native ant taxa in northern California. *Oecologia*, 127(1): 123–130.
- Shen P, Zhao XL, Cheng DF, Zheng YQ, Lin FY, 2007. Impacts of the imported fire ant, *Solenopsis Invicta* invasion on the diversity of native ants. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science)*, 32(2): 93–97. [沈鹏, 赵秀兰, 程登发, 郑永权, 林芙蓉, 2007. 红火蚁入侵对本地蚂蚁多样性的影响. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 32(2): 93–97.]
- Solley GO, Vanderwoude C, Knight GK, 2002. Anphylaxis due to red imported fire ant sting. *Medical Journal of Australia*, 176(11): 521–523.
- Song ZD, Lu YY, Xu YJ, Huang J, Liang GW, Zeng L, 2010. Dynamic of native ants on the lawn with the invasion of *Solenopsis invicta* Buren. *Acta Ecologica Sinica*, 30(5): 1287–1295. [宋贞

- 东, 陆永跃, 许益鏊, 黄俊, 梁广文, 曾玲, 2010. 红火蚁入侵草坪过程中蚂蚁类群变动趋势. *生态学报*, 30(5): 1287–1295.]
- Song ZD, Xu YJ, Lu YY, Huang J, Zeng L, 2009. Effects of chemical control on RIFA and native ants in greenbelt. *Acta Ecologica Sinica*, 29(11): 6148–6155. [宋侦东, 许益鏊, 陆永跃, 黄俊, 曾玲. 化学防治对绿化带中红火蚁及本地蚂蚁的影响. *生态学报*, 2009, 29(11): 6148–6155.]
- Tang QY, Feng MG, 2002. Applied Statistic Analysis and Data Processing System. Beijing: Science Press. 1–515. [唐启义, 冯明光, 2002. 实用统计分析及其 DPS 数据处理系统. 北京: 科学出版社. 1–515.]
- Tschinkel WR, 1987. Distribution of the fire ants *Solenopsis invicta* and *S. geminate* (Hymenoptera: Formicidae) in northern Florida in relation to habitat and disturbance. *Annals of the Entomological Society of America*, 81(1): 76–81.
- Vinson SB, 1997. Invasion of red imported fire ant (Hymenoptera: Formicidae) spread, biology, and impact. *American Entomologist*, 43(1): 23–39.
- Wang L, Lu YY, Xu YJ, Zeng L, 2013. The current status of research on *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: Formicidae) in mainland China. *Asian Myrmecology*, (5): 125–138.
- Wojcik DP, Allen CR, Brenner RJ, Forsys EA, Jouvenaz DP, Lutz RS, 2001. Red imported fire ants: impact on biodiversity. *American Entomologist*, 47(1): 16–23.
- Wu BQ, Lu YY, Liang GW, Zeng L, 2010. Influence of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: Formicidae) on the diversity of ant communities in a newly infested longan orchard and grass areas nearby. *Acta Ecologica Sinica*, 30(8): 2075–2083. [吴碧球, 陆永跃, 梁广文, 曾玲, 2010. 红火蚁对新入侵龙眼园和荒草地蚂蚁类群多样性的影响. *生态学报*, 30(8): 2075–2083.]
- Wu BQ, Lu YY, Zeng L, Liang GW, 2008. Influences of *Solenopsis invicta* Buren invasion on the native ant communities in different habitats in Guangdong. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 19(1): 151–156. [吴碧球, 陆永跃, 曾玲, 梁广文, 2008. 红火蚁入侵对广东多种生境中蚂蚁类群的影响. *应用生态学报*, 19(1): 151–156.]
- Wu J, Wang CL, 1995. The Ants of China. Beijing: China Forestry Press. 1–214. [吴坚, 王常禄, 1995. 中国蚂蚁. 北京: 中国林业出版社. 1–214.]
- Xi YB, Lu YY, Liang GW, Zeng L, Xu YJ, 2010. Effects of the red imported fire ant (RIFA), *Solenopsis invicta* Buren, on diversity and stability of invertebrate community in litchi orchards. *Acta Ecologica Sinica*, 30(8): 2084–2099. [席银宝, 陆永跃, 梁广文, 曾玲, 许益鏊, 2010. 红火蚁对荔枝园无脊椎动物群落多样性及稳定性的影响. *生态学报*, 30(8): 2084–2099.]
- Xu YJ, Lu YY, Zeng L, 2009. Colony structure and dynamic of the fire ant *Solenopsis invicta* Buren in several habitats. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 36(6): 575–576. [许益鏊, 陆永跃, 曾玲, 2009. 几种生境内红火蚁蚁群结构的变动规律. *植物保护学报*, 36(6): 575–576.]
- Zeng L, Lu YY, He XF, Zhang WQ, Liang GW, 2005. Identification of red imported fire ant *Solenopsis invicta* to invade mainland China and infestation in Wuchuan, Guangdong. *Chinese Bulletin of Entomology*, 42(2): 144–148. [曾玲, 陆永跃, 何晓芳, 张维球, 梁广文, 2005. 入侵中国大陆的红火蚁的鉴定及发生危害调查. *昆虫知识*, 42(2): 144–148.]
- Zhang B, Lu LH, Chen J, Gao Y, Zhong F, Qi GJ, He YR, 2012. Dietary habits of *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) in mulberry field and wasteland in South China. *Guangdong Agricultural Sciences*, 39(9): 83–86. [张波, 吕利华, 陈健, 高燕, 钟锋, 齐国君, 何余容, 2012. 华南地区桑园和荒地生境内红火蚁食物组成研究. *广东农业科学*, 39(9): 83–86.]