



张娟, 黄俊, 苏红利, 曾玲, 陆永跃. 红火蚁入侵对玉米植株上节肢动物群落的影响 [J]. 环境昆虫学报, 2022, 44 (6): 1473–1485.

红火蚁入侵对玉米植株上节肢动物群落的影响

张娟^{1,2,4*}, 黄俊^{1,3*}, 苏红利^{2,4}, 曾玲^{1**}, 陆永跃^{1**}

(1. 华南农业大学红火蚁研究中心, 广州 510642; 2. 浙江省园林植物与花卉研究所, 杭州 311251;

3. 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; 4. 浙江农林大学林业与生物技术学院, 杭州 311300)

摘要: 在农业生态系统中, 入侵性红火蚁 *Solenopsis invicta* Buren 是一种贪婪的节肢动物捕食者, 会不加区分地攻击害虫和有益昆虫。本文以玉米地作为研究生境, 系统调查并探讨红火蚁入侵对玉米植株上节肢动物群落的影响。结果表明, 红火蚁入侵使得玉米地内节肢动物的种类下降了 64.7%, 而减少的种类主要隶属于半翅目、鳞翅目和双翅目, 并且这种负面影响主要体现在玉米生长后期。随着玉米植株上红火蚁数量的增加, 相应的节肢动物群落物种丰富度、多样性和均匀度指数减少, 生态优势度指数增加。进一步通过系统聚类分析表明, 红火蚁发生区玉米植株上节肢动物类群结构在时间序列上波动较大, 其入侵已显著影响了生境内节肢动物群落。

关键词: 红火蚁; 节肢动物群落; 结构; 玉米

中图分类号: Q968.1; S433

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2022) 06-1473-13

Effects of *Solenopsis invicta* invasion on arthropod community on maize plants

ZHANG Juan^{1,2,4*}, HUANG Jun^{1,3*}, SU Hong-Li^{2,4}, ZENG Ling^{1**}, LU Yong-Yue^{1**} (1. Red Imported Fire Ant Research Center, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Zhejiang Institute of Garden Plants and Flowers, Hangzhou 311251, China; 3. 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; 4. College of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, China)

Abstract: In agroecosystems, invasive red fire ant *Solenopsis invicta* is voracious arthropod predator that indiscriminately attack pests and beneficial insects. Here, the effect of *S. invicta* invasion on the arthropod community of maize plant was investigated systematically. Results found that the invasion of *S. invicta* reduced the arthropod species in corn fields by 64.7%, and the reduced species mainly belonged to Hemiptera, Lepidoptera and Diptera. It is clear that the invasion of *S. invicta* has a negative impact on the diversity of arthropod communities on maize plants, which is mainly reflected in the later growth

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

* 共同第一作者: 张娟, 女, 1981 年生, 湖北天门人, 博士, 副研究员, 研究方向为园林病虫害防治和外来有害生物控制, E-mail: juanjuan0031@aliyun.com; 黄俊, 博士, 副研究员, 研究方向为农业害虫防治, E-mail: junhuang1981@126.com

** 共同通讯作者 Author for correspondence: 陆永跃, 博士, 教授, 研究方向为昆虫生态学、害虫治理与入侵生物学, E-mail: luyongyue@scau.edu.cn; 曾玲, 女, 硕士, 教授, 研究方向为昆虫生态学与入侵生物学, E-mail: zengling@scau.edu.cn

收稿日期 Received: 2022-08-27; 接受日期 Accepted: 2022-09-23

period of maize. With the increase of *S. invicta* density on maize plants, the species richness, diversity and evenness index of arthropod community decreased, while the Berger-Parker predominance index increased. Further systematic cluster analysis showed that the structure of arthropod groups on maize plants in the *S. invicta* infected areas fluctuated greatly in time series. We suggest the invasion of *S. invicta* has significantly affected the native arthropod community in maize field.

Key words: *Solenopsis invicta*; arthropod; community structure; maize

红火蚁 *Solenopsis invicta* Buren 隶属于膜翅目 Hymenoptera 蚁科 Formicidae 火蚁属 *Solenopsis*, 是国际公认的危险性最大的外来入侵物种之一 (Allen *et al.*, 1994; Callcott & Collins, 1996; Dowell *et al.*, 1997; 黄俊等, 2022)。2004 年 9 月, 红火蚁在我国大陆广东省吴川县首次被发现 (曾玲等, 2005; 陆永跃等, 2019), 截至 2022 年 7 月, 红火蚁已入侵我国 12 个省 (直辖市、自治区) 的 579 个县 (区、市)。

红火蚁具有明显的种群竞争优势, 在新入侵地可短时间内迅速发展成为优势种 (Hall & Mills, 2000; Wojcik *et al.*, 2001)。例如在美国南部各州, 红火蚁对无脊椎动物、小型啮齿动物、鸟类、海龟等活动造成严重影响, 尤其是对卵和幼体阶段的个体 (Parris *et al.*, 2002; Allen *et al.*, 2004; Epperson *et al.*, 2020; Braman *et al.*, 2021)。而在澳大利亚东南部, 红火蚁入侵使得当地原本广泛分布的绿纹树蛙 *Litoria aurea* 成为濒危物种 (Osborne, 1990)。通过对松树林、牧场和荒地等生境内的红火蚁食物结构进行调查发现, 其他节肢动物是其主要捕食对象, 特别是一些小型昆虫 (Wilson & Oliver, 1969), 而且鞘翅目昆虫出现的频率最高 (许益鏊等, 2009; 仇小龙等, 2014)。红火蚁入侵不仅影响节肢动物的种类和数量, 也会对节肢动物群落结构和功能造成负面影响, 而且入侵不同生境地其影响程度也会不同 (Allen *et al.*, 1997; Wojcik *et al.*, 2001; 王磊等, 2017; 陆永跃等, 2019)。在美国德克萨斯州的红火蚁发生区, 节肢动物的物种丰富度下降了 60% (Allen *et al.*, 1995), 而且显著降低了本地蚂蚁的丰富度和多样性 (Porter & Savignano, 1990; Wojcik, 1994; 吴碧球等, 2008, 2009), 甚至取代本地蚂蚁 (Pennisi, 2000); 红火蚁入侵还显著改变了玉米地蜘蛛类群结构 (黄俊等, 2012)。

目前, 评估红火蚁入侵对农田群落结构的影响主要还是建立在单一生境或单一时期 (季节)

的条件下, 尚缺乏对不同种植模式 (生境复杂度) 以及更长时间跨度的群落特征进行解析。鉴于此, 本研究设计了不同的红火蚁发生密度、植株不同种植方式和不同农事管理方式等因素, 系统研究了春秋玉米种植期间旱地节肢动物群落结构, 以期探明红火蚁入侵对旱地生境节肢动物类群影响特点, 综合评估红火蚁入侵对特定生态系统及特定时期生物安全所产生的影响。

1 材料与方法

1.1 试验地点

自 2009 年 4 月至 2010 年 2 月在华南农业大学宁西教学科研实习基地 (广州增城) 的玉米地开展节肢动物类群系统调查, 调查范围包括耕地地表、玉米植株及耕地周边 1 m 范围内的杂草带。

1.2 试验设计

根据作物种植方式、红火蚁种群密度、管理方式等设置 8 个试验小区, 各试验区面积约为 80 m², 各试验区及其代码情况如表 1 所示。各试验区边缘间隔 2.5 m, 间隔区域挖深为 60 cm 的水沟, 小区内 2.5 m 范围内不作调查。作物安排 2 造, 分别于 2009 年 4 月 9 日 (夏) 和 2009 年 9 月 14 日 (秋) 开始播种。各小区安排 5 陇地, 每陇安排 20 株玉米, 间作区则每陇间作 20 行绿豆, 每行安排 5 株绿豆。药防区施用化学杀虫剂的日期为 2009 年 4 月 27 日和 2009 年 5 月 10 日; 秋季试验不安排药防区。

1.3 调查方法

1.3.1 植株上节肢动物类群系统调查

夏季调查安排在 4 月至 7 月, 共 8 次调查; 秋季调查从玉米小喇叭口时期开始, 即 10 月至 11 月, 共 4 次调查。各小区每陇从第 5 株玉米开始调查, 详细记录连续 10 株玉米上各节肢动物的物种种类及数量, 每小区共调查 50 株; 采取扫网、管套、镊子夹取、数码相机拍摄等方法收集

节肢动物类群, 并带回室内进一步鉴定。本试验中把中性昆虫定义为不取食所调查的玉米植株的植食性昆虫、不捕食或寄生于主要害虫的天敌昆虫以及腐生性昆虫等。由于前期进行过蜘蛛群落调查 (黄俊等, 2012), 在本研究中, 蜘蛛和红火蚁均不列入物种结构组成中。

表 1 试验区及其代码
Table 1 Test area and its code

种植方式 Planting pattern	红火蚁种群密度 (巢/区) Population density of fire ant		管理方式 Management mode	
	高 (5 巢/区) High	低 (1 巢/区) Low	施用化学药剂 Chemical application	不施用化学药剂 Without chemicals
玉米 Corn	HM	LM	PM	NM
玉米间作绿豆 Corn was interplanted with mung beans	HI	LI	PI	NI

1.3.2 田边杂草节肢动物类群调查

杂草上节肢动物类群调查按 4 个小区进行, 分别为红火蚁高、低密度区、化学药剂防治区和对照区; 每个调查小区涉及的纯作及间作地块则合并调查并统计。调查安排在 5 月至 11 月, 共 5 次。调查方法为距离小区 1 m 范围的杂草带随机进行扫网, 左右扫动为一网, 各小区每侧扫 5 网, 每小区共 20 网。室内记录所得节肢动物类群的种类。该部分调查只记录种类, 不作数量上的分析。

1.3.3 地表蚂蚁类群调查

通过陷阱法和诱饵诱集法调查各小区地表蚂蚁的种类及数量。调查时间安排同 1.3.2, 调查方法同 Huang *et al.* (2010)。

1.4 数据处理及分析

1.4.1 红火蚁入侵对玉米植株上节肢动物类群多样性影响分析

采用 Monk 物种丰富度 (Monk, 1966)、Berger-Parker 生态优势度 (Berger-Parker, 1974)、Shannon-Wiener 多样性 (Shannon-Wiener, 1949)、Pielou 均匀度指数等公式 (Pielou, 1969) 分别计算夏秋季各处理区玉米植株上节肢动物类群的物种丰富度指数 (R)、生态优势度指数 (d)、多样性指数 (H')、均匀度指数 (J)。计算公式分别如下:

物种丰富度指数 (R): $d_{Mo} = S/N$

式中, S 为物种数, N 为群落中所有物种的个体数之和;

生态优势度指数 (d): $d = N_{max}/N$

式中: N_{max} 为优势种的种群数量, N 为群落中所有物种的个体数之和;

多样性指数 (H'): $H' = - \sum_{i=1}^s p_i \ln p_i$

式中, S 为物种种数, P_i 为第 i 种物种个体数占群体总个体数的比例;

均匀度指数 (J): $J = H'/H'_{max}$

式中, H'_{max} 表示在给定物种数 S 下的完全均匀群落的多样性。

在不同时间序列上各处理区玉米植株上的红火蚁数量及节肢动物物种丰富度、生态优势度、多样性和均匀度指数由 DMRT 方差分析及 Duncan 新复极差法比较分析。

1.4.2 玉米植株上节肢动物类群在时间系列上的系统聚类

利用群落特征指数 R 、 H' 、 J 、 d 和物种数及个体数作为类群聚类分析的指标, 利用系统聚类中的欧氏距离采用离差平方和法对各处理区玉米植株上节肢动物类群进行聚类分析。

欧氏距离:

$$D(i,j) = \sqrt{\sum_{k=1}^p (X_{ik} - X_{jk})^2}, (i,j = 1,2 \cdots p)$$

2 结果与分析

2.1 试验区节肢动物的组成与结构特征

2.1.1 节肢动物物种组成

在试验区共获得节肢动物 12 目 58 科 115 种

(表2); 其中隶属于膜翅目、半翅目、鞘翅目和半翅目的种类分别占总数的 25.2%、17.4%、16.5% 和 30.4%。害虫(螨)类、天敌类和中性昆虫的物种数分别为 56、43 和 16 种, 其中害虫(螨)类以半翅目(51.8%)、鞘翅目(16.1%)、

直翅目(10.7%) 和鳞翅目(8.9%) 居多, 天敌类以膜翅目(60.5%)、鞘翅目(18.6%) 和半翅目(14.0%) 居多, 而中性昆虫主要以双翅目(43.8%) 为主。

表2 旱地作物节肢动物类群的结构组成
Table 2 Composition of arthropod groups in dry-land crops

类群 Group	目 Order											合计 Total
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	
害虫（螨）类 Pests												
科数 Family	1	7	4	2	10	6	—	—	1	—	1	32
比率（%） Rate	3.1	21.9	12.5	6.3	31.3	18.8	—	—	3.1	—	3.1	
种数 Species	1	9	5	3	29	6	—	—	2	—	1	56
比率（%） Rate	1.8	16.1	8.9	5.4	51.8	10.7		—	3.6	—	1.8	
天敌类 Natural enemies												
科数 Family	7	2	—	1	4	—	1	—	—	—	—	15
比率（%） Rate	46.7	13.3	—	6.7	26.7	—	6.7	—	—	—	—	
种数 Species	26	8	—	1	6	—	2	—	—	—	—	43
比率（%） Rate	60.5	18.6	—	2.3	14.0		4.7	—	—	—	—	
中性昆虫 Neutral insects												
科数 Family	1	2	3	3	—	—	—	1	—	1	—	11
比率（%） Rate	9.1	18.2	27.2	27.2	—	—	—	9.1	—	9.1	—	
种数 Species	2	2	3	7	—	—	—	1	—	1	—	16
比率（%） Rate	12.5	12.5	18.8	43.8	—	—	—	6.3	—	6.3	—	
总种数 Total species	29	19	8	11	35	6	2	1	2	1	1	115
比率（%） Rate	25.2	16.5	7.0	9.6	30.4	5.2	1.7	0.9	1.7	0.9	0.9	

注: 表中字母 A、B、C、D、E、F、G、H、I、J 和 K 分别表示膜翅目、鞘翅目、鳞翅目、双翅目、半翅目、直翅目、脉翅目、蜚蠊目、缨翅目、等翅目和蜱螨目, — 表示未发现。Note: A、B、C、D、E、F、G、H、I、J and K in the table indicated Hymenoptera, Coleoptera, Lepidoptera, Diptera, Hemiptera, Orthoptera, Neuroptera, Blattodea, Thysanoptera, Isoptera and Acari, respectively, — represented not found.

2.1.2 红火蚁对玉米地节肢动物类群结构组成的影响

红火蚁入侵后对玉米地节肢动物的物种数量有较大影响, 在入侵区共调查到节肢动物 10 目 29 科 36 种; 在未入侵区共调查到节肢动物 12 目 40 科 102 种(图 1-A)。除此之外, 红火蚁入侵对于不同目昆虫的影响不同, 其中以隶属于半翅目、鳞翅目、双翅目的物种的减少幅度最大, 分别为 88.9%、71.4% 和 70.0% (图 1-B)。膜翅目主要以蚁科为主, 红火蚁未发生区蚁科物种数占该目

总物种数的 58.6%, 红火蚁发生区该值有所降低, 为 31.0%。

2.2 红火蚁入侵对玉米植株上节肢动物类群多样性影响分析

夏季调查发现, 在玉米心叶期(5月8日)之前, 所有小区均未发现觅食的红火蚁, 其他昆虫群落指标均无明显差异, 除了药防区(PM 和 PI)在第一次施用化学药剂之后其物种丰富度增加而多样性则下降。玉米抽穗开花(5月21日)之后, 红火蚁设置区的玉米植株上均发现红火蚁, 但是

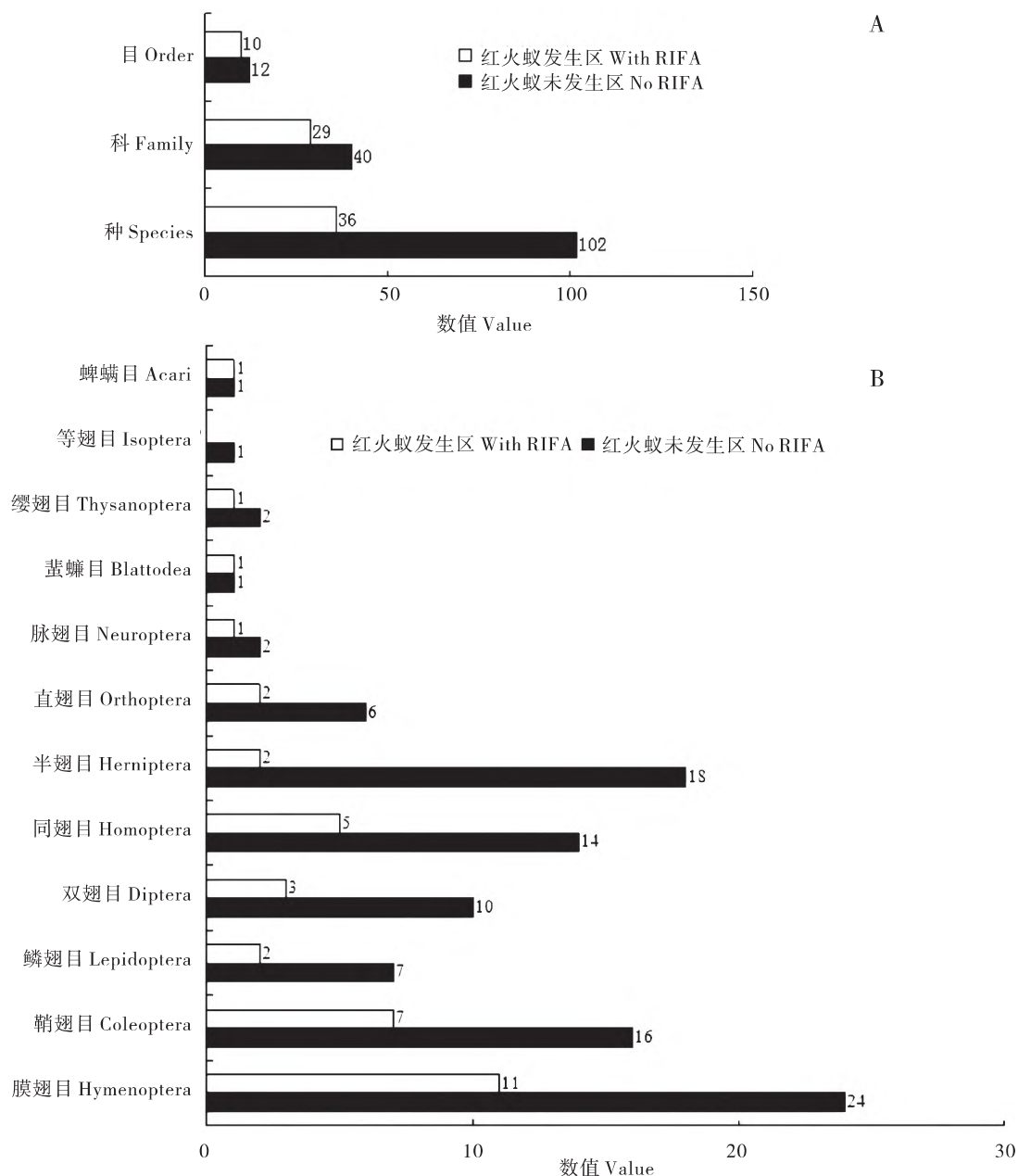


图1 红火蚁对玉米地节肢动物类群结构组成 (A) 和物种数 (B) 的影响
Fig. 1 Effect of *Solenopsis invicta* on the composition (A) and species number (B) of arthropod groups in maize fields

数量较少,药防-间作区 (PI) 的生态优势度指数显著高于对照-间作区 (NI),红火蚁高密度-间作区 (HI) 以及红火蚁低密度-纯作区 (LM) 多样性指数高于 PI 区,而 LM 区的均匀度指数则显著高于 PI 区。玉米成熟期 (6 月 16 日) 之后,红火蚁设置区的植株上的红火蚁数量迅速增长,以 HI 区的红火蚁数量 (56.60 ± 28.32 头/10 株) 最多,而物种丰富度和均匀度指数则以 PI 区最高,红火蚁设置区的丰富度指数和均匀度指数均显著低于药防区。玉米采收期 (7 月 1 日) 之后,红火蚁设置区丰富度、多样性和均匀度指数均显著降

低,与对照区差异显著,而生态多样性指数则显著上升;药防区的物种丰富度指数仍维持较高水平 (表 3)。由表 3 还可以看出,红火蚁设置区的丰富度指数随着时间的推移逐渐降低,其中 7 月 1 日丰富度指数降幅最大, HM、HI、LM 和 LI 区丰富度指数较前一调查日期分别下降了 90.9%、80.0%, 63.6% 和 63.6%。红火蚁设置区的生态优势度指数到了玉米生长后期均上升,而多样性和均匀度指数却下降明显;药防区的群落指标在时间序列上波动较大。

表3 红火蚁入侵对节肢动物群落指标的影响 (夏季)

Table 3 Impact of *Solenopsis invicta* on the index of arthropod community (Summer)

日期 (mm-dd) Date	样方 Site	红火蚁数量 (头/10株) (N) Number of RIFA	物种丰富度指数(R) Species richness index	生态优势度指数(d) Ecological dominance index	多样性 指数 (H) Diversity index	均匀度 指数 (J) Evenness index
04-24	HM	0.00 ± 0.00 a ^A	0.35 ± 0.06 ab ^A	0.70 ± 0.07 a ^A	1.15 ± 0.21 a ^A	0.69 ± 0.06 a ^A
	HI	0.00 ± 0.00 a ^A	0.24 ± 0.06 b ^A	0.75 ± 0.09 a ^A	1.36 ± 0.39 a ^A	0.51 ± 0.10 a ^A
	LM	0.00 ± 0.00 a ^A	0.35 ± 0.03 ab ^A	0.61 ± 0.07 a ^A	1.40 ± 0.12 a ^A	0.74 ± 0.07 a ^A
	LI	0.00 ± 0.00 a ^A	0.29 ± 0.03 ab ^A	0.70 ± 0.05 a ^A	1.32 ± 0.20 a ^A	0.65 ± 0.07 a ^A
	PM	0.00 ± 0.00 a ^A	0.27 ± 0.03 ab ^A	0.66 ± 0.06 a ^A	1.53 ± 0.23 a ^A	0.63 ± 0.08 a ^A
	PI	0.00 ± 0.00 a ^A	0.40 ± 0.05 a ^A	0.63 ± 0.06 a ^A	1.47 ± 0.16 a ^A	0.74 ± 0.07 a ^A
	NM	0.00 ± 0.00 a ^A	0.28 ± 0.03 ab ^A	0.79 ± 0.04 a ^A	0.86 ± 0.17 a ^A	0.64 ± 0.06 a ^A
	NI	0.00 ± 0.00 a ^A	0.38 ± 0.03 a ^A	0.68 ± 0.05 a ^A	1.45 ± 0.17 a ^A	0.67 ± 0.05 a ^A
04-30	HM	0.00 ± 0.00 a ^A	0.25 ± 0.04 b ^C	0.72 ± 0.03 a ^A	1.46 ± 0.16 ab ^A	0.60 ± 0.03 ab ^A
	HI	0.00 ± 0.00 a ^A	0.24 ± 0.04 b ^C	0.63 ± 0.05 a ^A	1.81 ± 0.27 a ^A	0.64 ± 0.06 a ^A
	LM	0.00 ± 0.00 a ^A	0.25 ± 0.06 b ^C	0.72 ± 0.02 a ^A	1.14 ± 0.10 ab ^{AB}	0.66 ± 0.04 a ^A
	LI	0.00 ± 0.00 a ^A	0.18 ± 0.02 b ^C	0.79 ± 0.05 a ^A	0.88 ± 0.16 bc ^{AB}	0.50 ± 0.07 ab ^A
	PM	0.00 ± 0.00 a ^A	0.90 ± 0.10 a ^A	0.90 ± 0.10 a ^A	0.20 ± 0.20 c ^B	0.22 ± 0.22 b ^A
	PI	0.00 ± 0.00 a ^A	0.70 ± 0.20 a ^{AB}	0.70 ± 0.20 a ^A	0.21 ± 0.21 c ^B	0.21 ± 0.21 b ^A
	NM	0.00 ± 0.00 a ^A	0.39 ± 0.06 b ^{BC}	0.61 ± 0.05 a ^A	1.57 ± 0.19 ab ^A	0.76 ± 0.04 a ^A
	NI	0.00 ± 0.00 a ^A	0.31 ± 0.08 b ^C	0.74 ± 0.10 a ^A	1.00 ± 0.38 b ^{AB}	0.56 ± 0.16 ab ^A
05-08	HM	0.00 ± 0.00 a ^A	0.36 ± 0.13 a ^A	0.53 ± 0.09 a ^A	1.81 ± 0.24 a ^A	0.74 ± 0.11 a ^A
	HI	0.00 ± 0.00 a ^A	0.27 ± 0.04 a ^A	0.54 ± 0.08 a ^A	2.11 ± 0.31 a ^A	0.72 ± 0.09 a ^A
	LM	0.00 ± 0.00 a ^A	0.32 ± 0.03 a ^A	0.44 ± 0.07 a ^A	2.05 ± 0.22 a ^A	0.88 ± 0.05 a ^A
	LI	0.00 ± 0.00 a ^A	0.31 ± 0.02 a ^A	0.37 ± 0.06 a ^A	2.38 ± 0.25 a ^A	0.86 ± 0.06 a ^A
	PM	0.00 ± 0.00 a ^A	0.37 ± 0.06 a ^A	0.46 ± 0.06 a ^A	2.09 ± 0.22 a ^A	0.86 ± 0.03 a ^A
	PI	0.00 ± 0.00 a ^A	0.39 ± 0.06 a ^A	0.51 ± 0.05 a ^A	2.10 ± 0.14 a ^A	0.80 ± 0.05 a ^A
	NM	0.00 ± 0.00 a ^A	0.24 ± 0.03 a ^A	0.46 ± 0.05 a ^A	2.19 ± 0.26 a ^A	0.82 ± 0.03 a ^A
	NI	0.00 ± 0.00 a ^A	0.33 ± 0.08 a ^A	0.40 ± 0.04 a ^A	2.31 ± 0.20 a ^A	0.82 ± 0.02 a ^A
05-14	HM	0.00 ± 0.00 a ^A	0.19 ± 0.06 b ^A	0.61 ± 0.11 a ^A	1.98 ± 0.57 a ^A	0.59 ± 0.14 b ^A
	HI	0.00 ± 0.00 a ^A	0.29 ± 0.06 ab ^A	0.39 ± 0.06 bc ^{AB}	2.33 ± 0.22 a ^A	0.84 ± 0.02 a ^A
	LM	0.00 ± 0.00 a ^A	0.19 ± 0.03 b ^A	0.52 ± 0.08 ab ^{AB}	2.26 ± 0.31 a ^A	0.71 ± 0.08 ab ^A
	LI	0.20 ± 0.20 a ^A	0.23 ± 0.06 ab ^A	0.45 ± 0.04 abc ^{AB}	2.14 ± 0.16 a ^A	0.77 ± 0.04 ab ^A
	PM	0.00 ± 0.00 a ^A	0.37 ± 0.08 a ^A	0.42 ± 0.05 abc ^{AB}	2.53 ± 0.18 a ^A	0.84 ± 0.03 a ^A
	PI	0.00 ± 0.00 a ^A	0.33 ± 0.05 ab ^A	0.30 ± 0.04 c ^B	2.69 ± 0.22 a ^A	0.87 ± 0.04 a ^A
	NM	0.00 ± 0.00 a ^A	0.20 ± 0.03 b ^A	0.42 ± 0.03 abc ^{AB}	2.37 ± 0.12 a ^A	0.81 ± 0.05 a ^A
	NI	0.00 ± 0.00 a ^A	0.18 ± 0.02 b ^A	0.34 ± 0.03 bc ^B	2.55 ± 0.09 a ^A	0.83 ± 0.03 a ^A
05-21	HM	0.20 ± 0.20 b ^A	0.16 ± 0.06 ab ^A	0.70 ± 0.08 ab ^{AB}	1.65 ± 0.44 abc ^{AB}	0.49 ± 0.12 bc ^{ABC}
	HI	0.20 ± 0.20 b ^A	0.21 ± 0.02 ab ^A	0.50 ± 0.06 bc ^{AB}	2.50 ± 0.20 a ^A	0.72 ± 0.05 ab ^{AB}

续表 3 Continued table 3

日期 (mm-dd) Date	样方 Site	红火蚁数量 (头/10株) (<i>N</i>) Number of RIFA	物种丰富度指数(<i>R</i>) Species richness index	生态优势度指数(<i>d</i>) Ecological dominance index	多样性 指数 (<i>H</i>) Diversity index	均匀度 指数 (<i>J</i>) Evenness index
06-02	LM	1.00 ± 0.63 a ^A	0.23 ± 0.05 a ^A	0.46 ± 0.08 c ^B	2.54 ± 0.29 a ^A	0.78 ± 0.08 a ^A
	LI	0.20 ± 0.20 b ^A	0.22 ± 0.07 ab ^A	0.51 ± 0.08 bc ^{AB}	2.15 ± 0.32 ab ^{AB}	0.68 ± 0.09 ab ^{ABC}
	PM	0.00 ± 0.00 b ^A	0.24 ± 0.06 a ^A	0.60 ± 0.07 abc ^{AB}	1.75 ± 0.23 abc ^{AB}	0.70 ± 0.07 ab ^{ABC}
	PI	0.00 ± 0.00 b ^A	0.08 ± 0.02 b ^A	0.77 ± 0.05 a ^A	1.22 ± 0.25 c ^B	0.37 ± 0.06 c ^C
	NM	0.00 ± 0.00 b ^A	0.16 ± 0.03 ab ^A	0.65 ± 0.04 abc ^{AB}	1.94 ± 0.16 abc ^{AB}	0.56 ± 0.06 abc ^{ABC}
	NI	0.00 ± 0.00 b ^A	0.10 ± 0.03 ab ^A	0.71 ± 0.05 ab ^{AB}	1.55 ± 0.23 bc ^{AB}	0.43 ± 0.08 c ^{BC}
	HM	3.20 ± 2.52 a ^A	0.09 ± 0.03 c ^C	0.60 ± 0.07 ab ^A	2.07 ± 0.31 b ^A	0.57 ± 0.07 bc ^B
	HI	6.20 ± 4.05 a ^A	0.11 ± 0.05 c ^C	0.65 ± 0.13 a ^A	1.80 ± 0.49 b ^A	0.48 ± 0.14 c ^B
	LM	3.40 ± 2.91 a ^A	0.11 ± 0.03 c ^C	0.66 ± 0.05 a ^A	2.00 ± 0.23 b ^A	0.51 ± 0.06 c ^B
	LI	3.00 ± 1.90 a ^A	0.15 ± 0.03 c ^{BC}	0.50 ± 0.08 ab ^A	2.63 ± 0.37 ab ^A	0.65 ± 0.09 bc ^{AB}
	PM	0.00 ± 0.00 a ^A	0.26 ± 0.04 b ^B	0.52 ± 0.03 ab ^A	2.10 ± 0.10 b ^A	0.78 ± 0.03 ab ^{AB}
	PI	0.00 ± 0.00 a ^A	0.43 ± 0.04 a ^A	0.38 ± 0.03 b ^A	2.36 ± 0.10 ab ^A	0.91 ± 0.02 a ^A
	NM	0.00 ± 0.00 a ^A	0.16 ± 0.02 c ^{BC}	0.43 ± 0.08 ab ^A	3.06 ± 0.33 a ^A	0.72 ± 0.08 abc ^{AB}
	NI	0.00 ± 0.00 a ^A	0.13 ± 0.02 c ^{BC}	0.45 ± 0.08 ab ^A	2.70 ± 0.15 ab ^A	0.65 ± 0.04 bc ^{AB}
06-16	HM	17.20 ± 10.15 b ^{AB}	0.11 ± 0.03 c ^C	0.51 ± 0.12 ab ^A	2.29 ± 0.44 a ^A	0.64 ± 0.11 bc ^{AB}
	HI	56.60 ± 28.32 a ^A	0.10 ± 0.04 c ^C	0.50 ± 0.08 ab ^A	2.21 ± 0.33 a ^A	0.60 ± 0.09 c ^B
	LM	3.60 ± 2.29 b ^B	0.11 ± 0.02 c ^C	0.63 ± 0.04 a ^A	2.10 ± 0.20 a ^A	0.56 ± 0.04 c ^B
	LI	14.60 ± 5.32 b ^{AB}	0.11 ± 0.03 c ^C	0.58 ± 0.08 a ^A	2.14 ± 0.32 a ^A	0.56 ± 0.09 c ^B
	PM	0.00 ± 0.00 b ^B	0.30 ± 0.05 b ^B	0.47 ± 0.05 ab ^A	2.17 ± 0.22 a ^A	0.84 ± 0.05 ab ^{AB}
	PI	0.00 ± 0.00 b ^B	0.47 ± 0.08 a ^A	0.33 ± 0.06 b ^A	2.80 ± 0.20 a ^A	0.92 ± 0.03 a ^A
	NM	0.00 ± 0.00 b ^B	0.15 ± 0.03 c ^{BC}	0.48 ± 0.06 ab ^A	2.81 ± 0.20 a ^A	0.70 ± 0.06 bc ^{AB}
07-01	NI	0.00 ± 0.00 b ^B	0.13 ± 0.02 c ^C	0.53 ± 0.05 ab ^A	2.55 ± 0.16 a ^A	0.61 ± 0.04 c ^B
	HM	29.20 ± 12.19 ab ^A	0.01 ± 0.00 d ^C	0.85 ± 0.05 a ^A	0.78 ± 0.25 c ^B	0.22 ± 0.08 d ^C
	HI	40.00 ± 23.68 a ^A	0.02 ± 0.00 d ^C	0.84 ± 0.02 a ^A	0.77 ± 0.11 c ^B	0.22 ± 0.03 d ^C
	LM	7.00 ± 2.55 b ^A	0.04 ± 0.01 cd ^C	0.80 ± 0.06 a ^{AB}	1.13 ± 0.27 bc ^{AB}	0.31 ± 0.07 cd ^C
	LI	24.80 ± 9.03 ab ^A	0.04 ± 0.02 cd ^C	0.72 ± 0.05 a ^{ABC}	1.44 ± 0.21 abc ^{AB}	0.36 ± 0.05 cd ^C
	PM	0.00 ± 0.00 b ^A	0.38 ± 0.06 a ^A	0.49 ± 0.09 bc ^{BC}	1.95 ± 0.32 ab ^{AB}	0.86 ± 0.04 a ^A
	PI	0.00 ± 0.00 b ^A	0.21 ± 0.06 b ^B	0.47 ± 0.11 c ^C	1.98 ± 0.42 ab ^{AB}	0.72 ± 0.16 ab ^{AB}
	NM	0.00 ± 0.00 b ^A	0.13 ± 0.04 bc ^{BC}	0.70 ± 0.09 ab ^{ABC}	2.24 ± 0.40 a ^A	0.50 ± 0.09 bc ^{BC}
	NI	0.00 ± 0.00 b ^A	0.10 ± 0.01 cd ^{BC}	0.71 ± 0.06 a ^{ABC}	2.07 ± 0.18 a ^A	0.45 ± 0.04 cd ^{BC}

注: 表中同列数字后有不同小写字母或上标大写字母者表示分别在 0.05 和 0.01 水平上差异显著, 表 3 至表 5 同。HM、HI、LM、LI、PM、PI、NM 和 NI 分别表示红火蚁高密度-纯作区、红火蚁高密度-间作区、红火蚁低密度-纯作区、红火蚁低密度-间作区、药防-纯作区、药防-间作区、对照-纯作区和对照-间作区。Note: Means in the same column followed by the different small letters or by the different superscript capital letters were significantly different (DMRT) at level of 0.05 and 0.01, and similar in table 3 to 5. HM、HI、LM、LI、PM、PI、NM 和 NI indicated high density-pure cultivation area, high density-intercropping area, low density-pure cultivation area, low density-intercropping area, chemical control-pure cultivation area, chemical control-intercropping area, control-pure cultivation area and control-intercropping area, respectively.

秋季调查发现,玉米心叶期后期(10月13日),除LM区之外,其他红火蚁设置区的玉米植株上均发现红火蚁,LM区的生态优势度指数最低而多样性和均匀度指数则最高。抽穗开花中后期(11月10日),玉米植株上的红火蚁数量急剧上升,其中HI区的红火蚁数量达到 62.80 ± 17.70 头/10株,但红火蚁高密度与低密度区之间的红火蚁数量却差异不显著;HM区丰富度、多样

性和均匀度指数均显著低于对照区,生态优势度显著高于对照区;红火蚁低密度-间作区(LI)丰富度、多样性和均匀度指数均显著高于对照区,生态优势度显著低于对照区。玉米成熟期(11月23日),玉米植株上的红火蚁数量变化不明显,且红火蚁发生区的丰富度指数显著低于对照区,但是各小区的生态优势度、多样性和均匀性指数之间均无明显差异(表4)。

表4 红火蚁入侵对节肢动物群落指标的影响(秋季)

Table 4 Impact of *Solenopsis invicta* on the index of arthropod community (Autumn)

日期 (mm-dd) Date	样方 Site	红火蚁数量 (头/10株) (N') Number of RIFA	物种丰富度指数(R) Species richness index	生态优势度指数(d) Ecological dominance index	多样性 指数(H) Diversity index	均匀度 指数(J) Eveness index
10-13	HM	0.40 ± 0.24 a ^A	0.09 ± 0.01 b ^A	0.73 ± 0.04 a ^A	1.41 ± 0.14 b ^C	0.47 ± 0.05 b ^C
	HI	0.20 ± 0.20 a ^A	0.14 ± 0.02 ab ^A	0.67 ± 0.04 a ^{AB}	1.63 ± 0.13 b ^{BC}	0.55 ± 0.05 b ^{BC}
	LM	0.00 ± 0.00 a ^A	0.09 ± 0.00 b ^A	0.44 ± 0.04 b ^C	2.37 ± 0.09 a ^A	0.78 ± 0.02 a ^A
	LI	0.20 ± 0.20 a ^A	0.09 ± 0.01 b ^A	0.75 ± 0.03 a ^A	1.29 ± 0.16 b ^C	0.43 ± 0.03 b ^C
	NM	0.00 ± 0.00 a ^A	0.13 ± 0.01 ab ^A	0.54 ± 0.06 b ^{BC}	2.20 ± 0.18 a ^{AB}	0.68 ± 0.06 a ^{AB}
	NI	0.00 ± 0.00 a ^A	0.17 ± 0.03 a ^A	0.53 ± 0.03 b ^{BC}	2.23 ± 0.18 a ^{AB}	0.68 ± 0.03 a ^{AB}
10-26	HM	1.60 ± 1.36 a ^A	0.08 ± 0.02 a ^A	0.62 ± 0.08 ab ^{AB}	1.88 ± 0.40 a ^A	0.60 ± 0.07 ab ^A
	HI	0.40 ± 0.40 a ^A	0.11 ± 0.02 a ^A	0.57 ± 0.07 ab ^{AB}	2.03 ± 0.19 a ^A	0.62 ± 0.06 a ^A
	LM	0.00 ± 0.00 a ^A	0.09 ± 0.02 a ^A	0.47 ± 0.04 b ^B	2.07 ± 0.23 a ^A	0.66 ± 0.03 a ^A
	LI	0.40 ± 0.24 a ^A	0.10 ± 0.02 a ^A	0.57 ± 0.03 ab ^{AB}	2.08 ± 0.14 a ^A	0.63 ± 0.02 a ^A
	NM	0.00 ± 0.00 a ^A	0.09 ± 0.02 a ^A	0.67 ± 0.07 a ^{AB}	1.74 ± 0.29 a ^A	0.52 ± 0.06 ab ^A
	NI	0.00 ± 0.00 a ^A	0.07 ± 0.01 a ^A	0.71 ± 0.01 a ^A	1.50 ± 0.11 a ^A	0.46 ± 0.03 b ^A
11-10	HM	56.40 ± 14.94 a ^A	0.01 ± 0.00 b ^A	0.90 ± 0.02 a ^A	0.47 ± 0.04 b ^A	0.17 ± 0.02 b ^A
	HI	62.80 ± 17.70 a ^A	0.01 ± 0.00 ab ^A	0.87 ± 0.02 ab ^A	0.51 ± 0.05 b ^A	0.19 ± 0.04 ab ^A
	LM	30.20 ± 6.57 ab ^{AB}	0.03 ± 0.01 ab ^A	0.82 ± 0.04 ab ^A	0.90 ± 0.15 ab ^A	0.32 ± 0.06 ab ^A
	LI	35.40 ± 18.73 ab ^{AB}	0.05 ± 0.02 a ^A	0.79 ± 0.05 b ^A	1.03 ± 0.25 a ^A	0.34 ± 0.08 a ^A
	NM	0.00 ± 0.00 b ^B	0.03 ± 0.01 ab ^A	0.88 ± 0.02 ab ^A	0.69 ± 0.10 ab ^A	0.22 ± 0.03 ab ^A
	NI	0.00 ± 0.00 b ^B	0.04 ± 0.02 ab ^A	0.84 ± 0.04 ab ^A	0.86 ± 0.23 ab ^A	0.24 ± 0.05 ab ^A
11-23	HM	52.20 ± 14.56 a ^{AB}	0.02 ± 0.01 c ^B	0.87 ± 0.03 a ^A	0.76 ± 0.16 a ^A	0.24 ± 0.03 a ^A
	HI	58.80 ± 23.59 a ^A	0.02 ± 0.00 c ^B	0.79 ± 0.09 a ^A	0.94 ± 0.25 a ^A	0.31 ± 0.07 a ^A
	LM	25.20 ± 6.96 ab ^{AB}	0.03 ± 0.01 bc ^{AB}	0.84 ± 0.03 a ^A	0.99 ± 0.18 a ^A	0.33 ± 0.04 a ^A
	LI	23.00 ± 10.81 ab ^{AB}	0.03 ± 0.01 bc ^{AB}	0.82 ± 0.05 a ^A	1.04 ± 0.22 a ^A	0.37 ± 0.08 a ^A
	NM	0.00 ± 0.00 b ^B	0.05 ± 0.01 ab ^{AB}	0.82 ± 0.04 a ^A	1.07 ± 0.19 a ^A	0.32 ± 0.06 a ^A
	NI	0.00 ± 0.00 b ^B	0.06 ± 0.01 a ^A	0.78 ± 0.04 a ^A	1.35 ± 0.15 a ^A	0.38 ± 0.04 a ^A

2.3 玉米植株上节肢动物类群在时间序列上的系统聚类

通过对夏季调查数据的系统聚类分析发现,

对照区的聚类结果体现了玉米植株上节肢动物结构变化随时间序列变化的规律。例如,4月24日和4月30日相似且同为玉米苗期,5月8日和

5 月 14 日相似且同为玉米心叶期, 5 月 21 日、6 月 2 日、6 月 16 日和 7 月 1 日为玉米的生长后期, 其节肢动物类群结构与功能也较为相似。但是, 红

火蚁高密度区的聚类结果与对照区差异较大, 而且种植方式对聚类结果也有影响, 药防区的聚类结果未见明显规律性 (图 2, 表 5)。

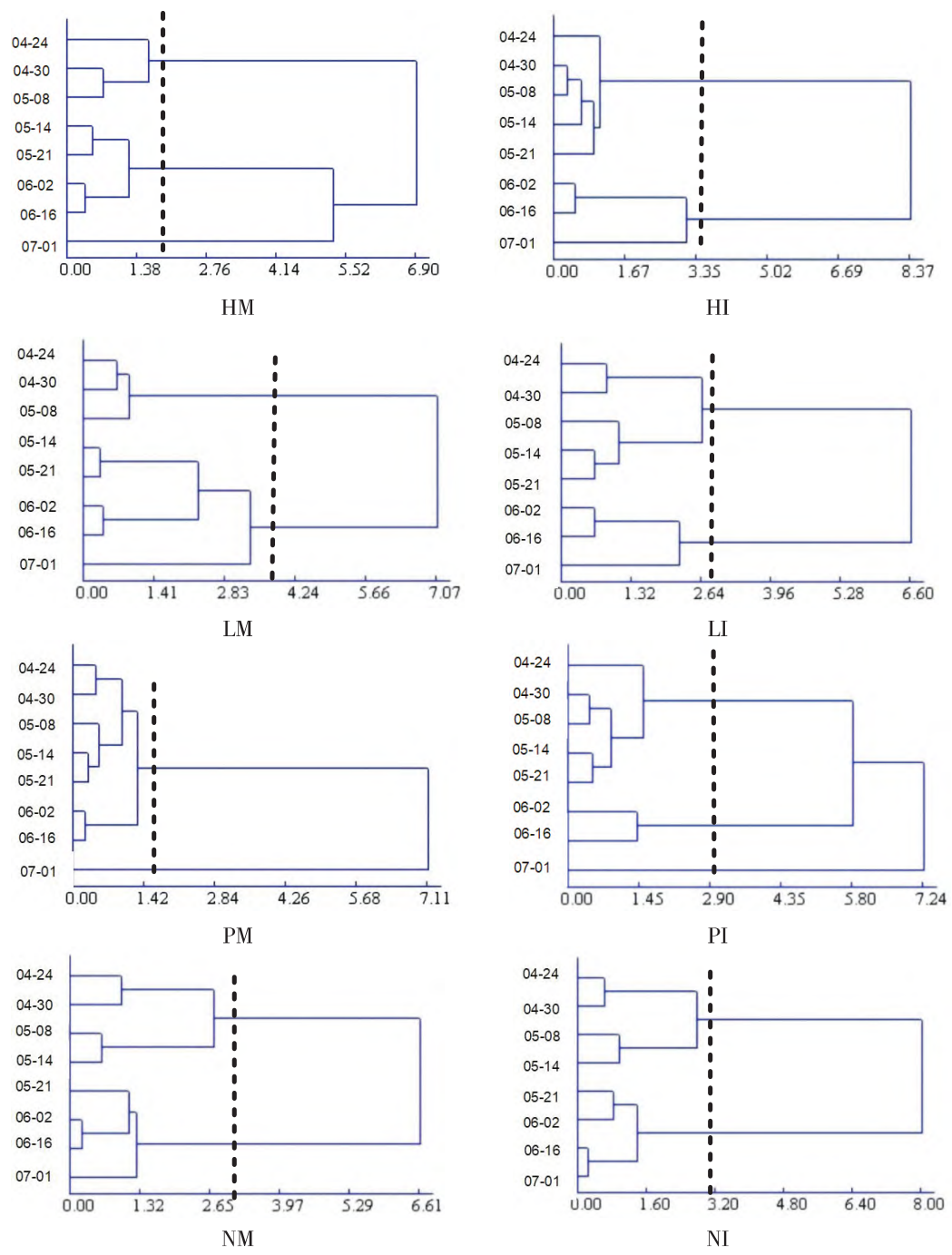


图 2 各处理区不同时期节肢动物类群系统聚类图 (夏季; 横坐标表示欧氏距离, 图 3 同)

Fig. 2 Dendrogram of cluster analysis on the arthropod community in different dates
(Summer; Abscissa indicated the Euclidean distance, and similar in Fig. 3)

注: HM、HI、LM、LI、PM、PI、NM 和 NI 分别表示红火蚁高密度-纯作区、红火蚁高密度-间作区、红火蚁低密度-纯作区、红火蚁低密度-间作区、药防-纯作区、药防-间作区、对照-纯作区和对照-间作区。Note: HM、HI、LM、LI、PM、PI、NM 和 NI indicated high density-pure cultivation area, high density-intercropping area, low density-pure cultivation area, low density-intercropping area, chemical control-pure cultivation area, chemical control-intercropping area, control-pure cultivation area and control-intercropping area, respectively.

表 5 各处理小区玉米植株上节肢动物类群聚类分析结果 (夏季)

Table 5 Result of cluster analysis on the arthropod community in different sites (Summer)

处理小区 Site	欧氏距离 <i>D</i>	类别 Sort			
		I	II	III	IV
HM	1.38	04-24	04-30, 05-08	05-14, 05-21, 06-02, 06-16	07-01
HI	1.67	04-24, 04-30, 05-08, 05-14, 05-21	06-02, 06-16	07-01	
LM	1.41	04-24, 04-30, 05-08	05-14, 05-21	06-02, 06-16	07-01
LI	1.32	04-24, 04-30	05-08, 05-14, 05-21	06-02, 06-16	07-01
PM	1.42	04-24, 05-08, 05-14, 05-21, 06-02, 06-16, 07-01	04-30		
PI	1.45	04-24	05-08, 05-14, 06-02, 06-16	05-21, 07-01	04-30
NM	1.32	04-24, 04-30	05-08, 05-14	05-21, 06-02, 06-16, 07-01	
NI	1.60	04-24, 04-30	05-08, 05-14	05-21, 06-02, 06-16, 07-01	

通过对秋季调查数据的系统聚类分析发现, 红火蚁高密度 - 纯作区 (HM) 抽穗开花期 (10月26日) 与成熟期 (11月23日) 节肢动物群落较为相似 (欧氏距离 $D = 1.14$), 而同处于抽穗开花期的10月26日与11月10日却距离较远。红火蚁低密度 - 纯作区 (LM)、红火蚁低密度 -

间作区 (LI) 和对照 - 纯作区 (NM) 节肢动物群落的聚类结果一致, 而红火蚁高密度 - 纯作区 (HM) 与红火蚁高密度 - 间作区 (HI) 的聚类结果一致 (图3, 表6)。秋季玉米栽种过程中, 因遭遇几次强冷空气, 所以对生境内节肢动物群落也有一定影响。

表 6 各处理区玉米植株上节肢动物类群聚类分析结果 (秋季)

Table 6 Result of cluster analysis on the arthropod community in different sites (Autumn)

处理小区 Site	欧氏距离 <i>D</i>	类别 Sort			
		I	II	III	IV
HM	1.14	10-13, 10-26	11-10	11-23	
HI	1.18	10-13, 10-26	11-10	11-23	
LM	0.84	10-13, 10-26	11-10, 11-23		
LI	0.71	10-13	10-26	11-10	11-23
NM	0.66	10-13	10-26	11-10	11-23
NI	0.49	10-13	10-26	11-23	11-10

3 结论与讨论

本研究结果表明, 红火蚁入侵降低了旱作地节肢动物物种数量, 特别是对半翅目、鳞翅目和双翅目的节肢动物影响较大。进一步分析了红火蚁入侵对玉米植株上节肢动物类群多样性的影响, 结果表明, 随着玉米生长期的推进, 植株上红火蚁的数量逐渐增多, 而且是红火蚁高密度区高于

低密度区, 间作区高于纯作区。随着植株上红火蚁开始活跃, 节肢动物类群多样性也开始发生改变, 即红火蚁发生区的物种丰富度、多样性、均匀度指数下降, 而生态优势度指数上升。红火蚁高密度区的这种变化要比低密度区的明显, 但是红火蚁发生区的生境复杂度对结果的影响不是特别明显, 上述结果主要反映在夏季调查中。秋季调查由于受到冷空气及作物生长状况的影响, 对节肢动物类群物种数和个体数造成一定的误差,

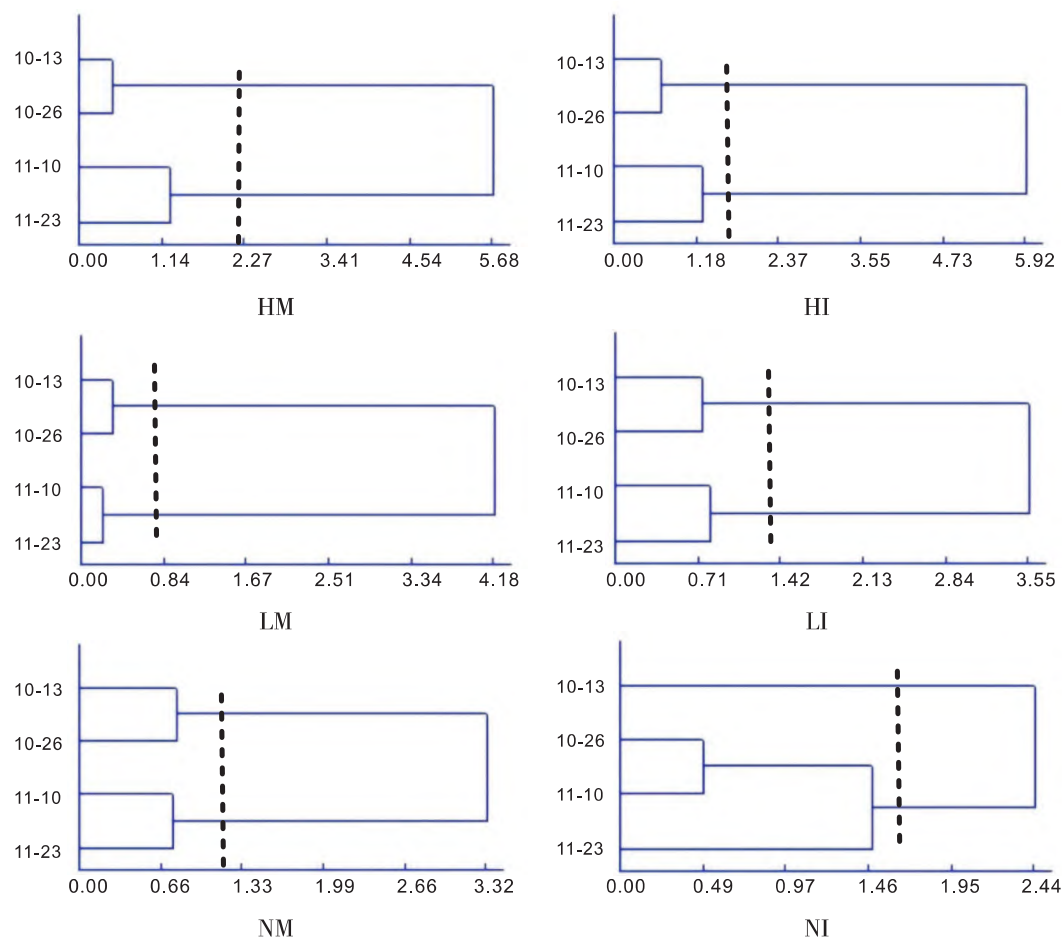


图3 各处理区不同时期节肢动物类群系统聚类图 (秋季)
Fig.3 Dendrogram of cluster analysis on the arthropod community in different dates (Autumn)

但是红火蚁发生区植株上节肢动物类群多样性的变化趋势与夏季调查结果大体相似。以上结果与前人研究结果类似,即红火蚁入侵对当地无脊椎动物、脊椎动物及其它蚂蚁造成的破坏和不利影响是导致生物多样性丧失的主要原因之一 (Tschinkel, 1998; Pennisi, 2000; Eubanks *et al.*, 2001; Kaplan & Eubanks, 2002; Diaz *et al.*, 2004),且入侵区域节肢动物种类、多样性指数和均匀度指数随着红火蚁入侵时间增大而逐渐降低 (黄俊等, 2012)。

除此之外,本研究系统调查了红火蚁入侵旱地作物生境对玉米植株上节肢动物类群多样性的影响。国外相关调查研究选择在棉花、大豆和花生上进行,而本试验选择玉米植株有其独特性和优越性。首先玉米是我国华南地区最主要、典型的旱地作物之一,经济效益非常明显,从而凸显了本研究的实际生产价值;其次玉米植株较棉花、大豆和花生更具有空间层次,利于调查取样及拍

摄,而且玉米生长后期的高度也适合人站立时调查;最重要的是,目前国内外很多学者都想探究当红火蚁觅食场所远离蚁巢或是处于空间较高位置时,它的攻击力以及竞争优势是否依然体现。在 20 世纪 60 及 80 年代,有学者选择甘蔗地开展相关研究,但仅仅评估了红火蚁对甘蔗螟虫的控制作用 (Negm & Hensley, 1967; Reagan *et al.*, 1972; Ali *et al.*, 1984; Bessin & Reagan, 1989),本研究的调查范围扩大到玉米植株上所有的节肢动物类群,全面分析红火蚁对其他节肢动物类群的影响,随着旱地作物生境复杂度的增加 (玉米生长后期和间作区),红火蚁的种群数量也增加,从而导致植株上节肢动物类群物种丰富度、多样性、均匀度指数下降,而生态优势度指数上升。因此,今后应从红火蚁为害程度和生境复杂度等方面,综合评估红火蚁入侵对特定生态系统内节肢动物群落的影响。

致谢: 感谢华南农业大学张维球教授帮助鉴定节肢动物标本。

参考文献 (References)

- Ali AD, Reagan TE, Flynn JL. Influence of selected weedy and weed-free sugarcane habitats on diet composition and foraging activity of the imported fire ant (Hymenoptera: Formicidae) [J]. *Environmental Entomology*, 1984, 13 (4): 1037–1041.
- Allen CR, Demaris S, Lutz RS. Red imported fire ant impact on wildlife: An overview [J]. *Texas Journal of Science*, 1994, 46: 51–59.
- Allen CR, Epperson DM, Garmestani AS. Red imported fire ant impacts on wildlife: A decade of research [J]. *The American Midland Naturalist*, 2004, 152 (1): 88–103.
- Allen CR, Lutz RS, Demaris S. Red imported fire ant impacts on Northern Bobwhite populations [J]. *Ecological Applications*, 1995, 5 (3): 632–638.
- Allen CR, Lutz RS. Effects of red imported fire ants on recruitment of white-tailed deer fawns [J]. *Journal of Wildlife Management*, 1997, 61: 911–916.
- Bessin RT, Ragan TE. Cultivar resistance and arthropod predation of sugarcane borer (Lepidoptera: Pyralidae) affects incidence of dead hearts in *Louisiana sugarcane* [J]. *Journal of Economic Entomology*, 1989, 86 (3): 929–932.
- Braman CA, Pfaller JB, Williams KL, et al. Presence of native and non-native ants linked to lower emergence success of loggerhead sea turtle nests: Implications for management [J]. *Environmental Entomology*, 2021, 50 (3): 649–657.
- Callcott AMA, Collins HL. Invasion and range expansion of imported fire ants (Hymenoptera: Formicidae) in north America from 1918–1995 [J]. *The Florida Entomologist*, 1996, 79 (2): 240–251.
- Diaz R, Knutson A, Bernal JS. Effect of the red imported fire ant on cotton aphid population density and predation of bollworm and beet armyworm eggs [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2004, 97: 222–229.
- Dowell RV, Gilbert A, Sorensen J. Red imported fire ant found in California [J]. *California Plant Pest and Disease Report*, 1997, 16 (3–4): 50–55.
- Epperson DM, Allen CR, Hogan K. Red imported fire ants reduce invertebrate abundance, richness, and diversity in gopher tortoise burrows [J]. *Diversity*, 2020, 13: 7.
- Eubanks MD. Estimates of the direct and indirect effects of red imported fire ants on biological control [J]. *Biological Control*, 2001, 21 (1): 35–43.
- Hall S, Mills E. Exotic species in large lakes of the world [J]. *Aquatic Ecosystem Health and Management*, 2000, 3 (1): 105–135.
- Huang J, Xu YJ, Lu YY, et al. Effects of red imported fire ants (Hymenoptera: Formicidae) on the relationship between native ants and aphids in mung bean fields in China [J]. *Sociobiology*, 2010, 55: 415–425.
- Huang J, Xu YJ, Lu YY, et al. Effects of *Solenopsis invicta* invasion on the diversity of spider communities in a corn field [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23 (4): 1111–1116. [黄俊, 许益鏊, 陆永跃, 等. 红火蚁入侵对玉米地蜘蛛类群多样性的影响 [J]. *应用生态学报*, 2012, 23 (4): 1111–1116]
- Kaplan I, Eubanks MD. Disruption of cotton aphid (Homoptera: Aphididae) – natural enemy dynamics by red imported fire ants (Hymenoptera: Formicidae) [J]. *Environmental Entomology*, 2002, 31 (6): 1175–1183.
- Lu YY, Zeng L, Xu YJ, et al. Research progress of invasion biology and management of red imported fire ant [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 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*, 2019, 40 (5): 149–160]
- Ministry of agriculture and rural affairs. List of national agricultural plant quarantine pests distribution administrative areas [EB/OL]. (2021–04–20) [2022–05–09]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202104/t20210422_6366376.htm. [农业农村部. 全国农业植物检疫性有害生物分布行政区名录 [EB/OL]. (2021–04–20) [2022–05–09]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202104/t20210422_6366376.htm]
- Negm A, Hensley SD. The relationship of arthropod predators to crop damage inflicted by the sugarcane borer [J]. *Journal of Economic Entomology*, 1967, 60 (6): 1503–1506.
- Osborne WS. Declining frog populations and extinctions in the Canberra region [J]. *Bogong*, 1990, 11: 4–7.
- Parris LB, Lamont MM, Carthy RR. Increased incidence of red imported fire ants (Hymenoptera: Formicidae) presence in loggerhead sea turtle (Testudines: Cheloniidae) nests and observations of hatchling mortality [J]. *Florida Entomologist*, 2002, 85: 514–517.
- Pennisi E. Ecology: When fire ants move in, others leave [J]. *Science*, 2000, 289 (5477): 231.
- Porter SD, Savignano DA. Invasion of polygyne fire ants decimates native ants and disrupts arthropod community [J]. *Ecology*, 1990, 71 (6): 2095–2106.
- Qiu XL, Zhang B, He YR, et al. Dietary preference and polymorphism of *Solenopsis invicta* foragers in China in summer and autumn [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2014, 35 (6): 63–66. [仇小龙, 张波, 何如容, 等. 夏秋季红火蚁工蚁的觅食偏好性及与多态性的关系 [J]. *华南农业大学学报*, 2014, 35 (6): 63–66]
- Reagan TE, Coburn G, Hensley SD. Effects of mirex on the arthropod fauna of a *Louisiana sugarcane* field [J]. *Environmental Entomology*, 1972, 1 (5): 588–591.
- Tschinkel WR. The reproductive biology of fire ant societies [J]. *BioScience*, 1998, 48 (8): 593–605.
- Wang L, Wang Z, Zeng L, et al. Negative effects of red imported fire ant (*Solenopsis invicta* Buren) invasion on arthropod community in the banana plantations [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2017, 39 (4): 835–847. [王磊, 王正, 曾玲, 等. 红火蚁入侵对香蕉园节肢动物群落的负面效应研究 [J]. *环境昆虫学报*, 2017, 39 (4): 835–847]
- Wilson NL, Oliver AD. Food habits of the imported fire ant in pasture

- and pine forest area in Southeastern Louisiana [J]. *Journal of Economic Entomology*, 1969, 62 (6): 1268 – 1271.
- Wojcik DP. Impact of the red imported fire ant on native ant species in Florida. In: Williams DF, Editor, *Exotic Ants: Biology, Impact, and Control of Introduced Species* [M]. Boulder: Westview Pres, 1994: 269 – 281.
- Wojcik DP, Allen CR, Brenner RJ, *et al.* Red imported fire ants: Impact on biodiversity [J]. *American Entomologist*, 2001, 47 (1): 16 – 23.
- Wu BQ, Lu YY, Zeng L, *et al.* Influences of *Solenopsis invicta* Buren invasion on the native ant communities in different habitats in Guangdong [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19 (1): 151 – 156. [吴碧球, 陆永跃, 曾玲, 等. 红火蚁入侵对广东多种生境中蚂蚁类群的影响 [J]. 应用生态学报, 2008, 19 (1): 151 – 156]
- Wu BQ, Lu YY, Zeng L, *et al.* Influence of red imported fire ant (RIFA) on ant community in different distances around separate mound [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42 (12): 4248 – 4259. [吴碧球, 陆永跃, 曾玲, 等. 单个蚁巢红火蚁对不同距离蚂蚁类群的影响 [J]. 中国农业科学, 2009, 42 (12): 4248 – 4259]
- Xu YJ, Zeng L, Lu YY, *et al.* Food content of refuse piles of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: formicidae) [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29 (11): 5791 – 5798. [许益鏖, 曾玲, 陆永跃, 等. 红火蚁弃尸堆的食物结构 [J]. 生态学报, 2009, 29 (11): 5791 – 5798]
- 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为害调查 [J]. 昆虫知识, 2005, 42 (2): 144 – 148]