

• 研究报告 •

黄顶菊凋落物分解对节肢动物群落结构的影响

晏 静^{1,2} 张国良¹ 张瑞海¹ 宋 振¹ 赵晓红¹ 刘玉升² 付卫东^{1*}

1 (中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

2 (山东农业大学植物保护学院, 山东泰安 271018)

摘要: 选择黄顶菊(*Flaveria bidentis*)入侵的林地、农田、荒地、沟渠等4种生境作为调查样地, 比较黄顶菊与本地植物凋落物的分解速率及凋落物分解对节肢动物群落结构的影响。于2014年10月凋落物高峰期在样地内分别搜集黄顶菊与本地植物的凋落物, 每种凋落物称取20 g装入尼龙网分解袋中, 放入各生境。2015年的每个月将不同生境不同处理凋落袋各取回10袋, 用Tullgren法分离节肢动物。4种生境共捕获17,466头, 隶属8纲18目, 4种生境的优势类群皆为蜱螨目和啮目。其中, 林地、农田、荒地、沟渠4种生境处理组中节肢动物数量分别为1,698头, 1,838头, 2,631头, 3,413头, 分别比对照组高18%, 53%, 22%, 11%。多数月份黄顶菊凋落物中的节肢动物丰富度及多样性指数高于同生境对照组, 并且在黄顶菊生长盛期差异显著; 黄顶菊凋落物的分解速率高于对照植物分解速率, 且各月份凋落物分解速率动态与节肢动物数量变化动态呈显著相关。黄顶菊凋落物对节肢动物的影响与人为干扰程度有关, 这种影响在人为干扰较小的荒地及沟渠生境中更为明显。综上所述, 黄顶菊凋落物的分解改变了节肢动物群落结构, 并引起节肢动物多样性的升高。

关键词: 黄顶菊; 凋落物; 分解; 节肢动物; 生物多样性

The effect of *Flaveria bidentis* litter decomposition on the structure of arthropod communities

Jing Yan^{1,2}, Guoliang Zhang¹, Ruihai Zhang¹, Zhen Song¹, Xiaohong Zhao¹, Yusheng Liu², Weidong Fu^{1*}

1 Institute of Agricultural Environment and Sustainable Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081

2 College of Plant Protection, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018

Abstract: An investigation was conducted between fall 2014 and 2015 to illustrate litter decomposition of the non-native plant species *Flaveria bidentis* and its effects on the structure of local arthropod communities. The survey was implemented in four different habitats, including forestland, cultivated fields, uncultivated land and ditches, which were all invaded by *F. bidentis*. The collection yielded a total number of 17,466 individuals belonging to 8 classes from 18 orders dominated by Arachnoidea and Psocoptera. In all habitat types, the numbers of arthropod individuals collected from *F. bidentis* treatments were noticeably more than those collected from neighboring plants as a control treatment (by 11–53%). Throughout the survey season, species richness and diversity index of arthropods were usually higher in the *F. bidentis* litter than those in the control, and reached significant levels at the peak of *F. bidentis* growth. Results also showed that *F. bidentis* litter decomposed faster than the litter of neighboring plants. Other results also suggested that the effects of *F. bidentis* litter on arthropod might be associated with the extent of human disturbance, indicating that habitats rarely visited by humans such as uncultivated land and ditches might be affected more than forestland and cultivated fields, which had greater intensity of human activity. In summary, the invasion of *F. bidentis* changes the community structure of arthropods and increases the diversity of arthropods in four habitat types.

Key words: *Flaveria bidentis*; litter; decomposition; arthropods; biodiversity

收稿日期: 2016-02-18; 接受日期: 2016-04-15

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201103027)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: fuweidong@caas.cn

外来植物入侵是全球变化的一部分, 它打破地理隔离, 对入侵地生物多样性造成严重的生态危害(Mack et al, 2000; 万方浩等, 2002)。评价外来植物生态后果的研究多集中在入侵植物对生态系统地上部分的影响, 而对地下生物群落与多样性的研究相对较少, 尤其缺乏对土壤生物多样性的研究(陈慧丽等, 2005; 类延宝等, 2010)。土壤动物在土壤生态系统食物链中发挥着重要作用, 其群落结构的稳定及物种多样性的变化能反映土壤生态系统的健康程度(Wood et al, 2012; 崔洋等, 2012)。

随着对土壤生态系统的不断认识, 研究人员越来越重视外来植物入侵对土壤动物多样性的影响及其影响机制。如陈雯等(2012)研究发现, 加拿大一枝黄花(*Solidago canadensis*)入侵浙江省金华市后, 通过改变入侵地土壤理化性质进而影响土壤动物的群落结构, 且土壤动物的类群数、个体数量随着入侵程度的增大而减少。谢俊芳等(2011)调查豚草(*Ambrosia artemisiifolia*)入侵广东省后中小型土壤动物的群落特征, 发现其总个体数及线虫类、弹尾目个体数显著增加, 原因之一是豚草形成单优群落改变了局部小气候环境, 为土壤动物优势类群提供了更好的栖息环境。但目前尚缺乏外来入侵植物凋落物的分解对土壤动物, 尤其是节肢动物群落结构影响的研究实例, 以及外来植物对土壤生态系统的危害评估及更深入的机制研究。

黄顶菊(*Flaveria bidentis*)原产于南美洲, 2001年在我国天津南开大学与河北衡水相继发现, 现已扩散蔓延至河北省邯郸、邢台等56个县(市、区)、河南、山东及天津部分地区(刘全儒, 2005; 任艳萍等, 2008; 张国良等, 2014)。黄顶菊通过与本地植物竞争水分、光照、养分及生存空间或分泌释放化感物质等抑制本地物种生长, 降低物种多样性, 给入侵地的农业生产与生态环境带来严重的威胁(皇甫超河等, 2009; 张国良等, 2013)。我国对黄顶菊的研究主要集中在鉴别特征(高贤明等, 2004)、分布危害(刘全儒, 2005; 张天瑞等, 2010)、防治方法(张国良等, 2010)等方面, 而对土壤动物群落的影响鲜见报道。

本文采用凋落袋法调查了不同生境黄顶菊凋落物中的节肢动物群落结构, 探讨黄顶菊凋落物的分解过程是否对节肢动物群落多样性产生影响, 以期评估黄顶菊入侵对地下生物多样性尤其是节肢动物群落结构的影响效应提供科学依据, 为探究

黄顶菊入侵对土壤生态系统的影响提供更多的理论基础。

1 研究区域概况

河北省巨鹿县地处37°08'–37°25' N, 114°48'–115°13' E, 属于暖温带季风区中的大陆性气候。年平均气温13℃, 1月平均气温–3.9℃, 7月平均气温28.8℃, 年平均降水量585 mm, 多集中在7、8月, 年日照时数2,738 h, 光照充足, 雨热同期, 该地区黄顶菊发生早且危害严重(刘宁等, 2014)。

选取黄顶菊入侵的4种典型生境: (1)林地生境。紧挨农田, 地势平坦, 以河北杨(*Populus × hopeiensis*)为主, 伴有较多狗尾草(*Setaria viridis*)、牛筋草(*Eleusine indica*)等禾本科杂草, 黄顶菊长势较弱。(2)农田生境。地势低洼, 以金银花(*Lonicera japonica*)为主, 受定期农事活动影响, 农田边缘黄顶菊长势较弱。(3)荒地生境。地势平坦, 黄顶菊植株高大, 竞争优势明显, 局部形成单优群落。(4)沟渠生境。地势倾斜, 水分充足, 黄顶菊植株高大密集, 长势旺盛, 形成大面积单优群落。

2 研究方法

2.1 样地设置与样品处理

每个生境中设置处理组与对照组2个代表性样地, 处理组为黄顶菊入侵地, 对照组为非黄顶菊入侵地, 相邻样地间隔10 m。于2014年10月凋落物高峰期在样地内采集黄顶菊与代表性植物河北杨、黄花蒿(*Artemisia annua*)、芦苇(*Phragmites australis*)、金银花的凋落物, 带回实验室在自然条件下风干, 称取20 g风干后的凋落物装入孔径为5 mm的尼龙袋中(30 cm × 20 cm), 处理组凋落袋中放置黄顶菊凋落物, 对照组凋落袋中分别放置对照植物凋落物。于2014年11月分别放入样地, 每个样地放置凋落袋120袋, 即总袋数为960袋。2015年1–12月, 每月从4种生境处理组与对照组各取回10袋凋落袋, 装入透气的收集袋内, 并低温保存带回实验室处理。采用Tullgren法分离凋落袋内的中小型土壤节肢动物, 将分离完节肢动物的凋落物于80℃烘干称重(崔振东, 1985), 体视解剖镜和生物显微镜镜检计数并进行分类, 标本分类鉴定依据《中国土壤动物检索图鉴》与《昆虫分类检索》(李鸿兴等, 1987; 尹文英, 1998)。

2.2 数据处理

节肢动物个体数占总个体数10%以上定义为优势类群, 1–10%为常见类群, 1%以下为稀有类群(谭波等, 2012)。节肢动物群落多样性指标:

丰富度(species richness): 以地表土壤动物类群数(S)表示(马克平, 1994)。

Shannon-Wiener多样性指数(Shannon & Weaver, 1949): $H' = -\sum P_i \ln P_i$ (1)

Simpson多样性指数(Simpson, 1949): $D = 1/\sum P_i^2$ (2)

Pielou均匀度指数(Pielou, 1975): $E = H'/\ln S$ (3)

式中, P_i 为第 i 类群的个体数占群落总个体数的比例。

凋落物质量(累积)损失率(李艳红, 2012):

$$Lc(\%) = \{(X_0 - X_t)/X_0\} \times 100 \quad (4)$$

式中, X_0 为样品的初始干质量, X_t 为样品分解 t 段时间后的干质量。

凋落物质量月净损失率: $L_n(\%) = Lc_t - Lc_{(t-1)}$ (5)

式中, Lc_t 为当月累积损失率, $Lc_{(t-1)}$ 为前一月累积损失率。

采用Origin9软件制作凋落物中节肢动物数量及多样性变化动态图; 采用SPSS19.0软件进行 t -检验, 比较处理组与对照组凋落物分解速率及群落特征指标的差异显著性, 并分析凋落物分解动态与节肢动物数量变化动态的相关性。

3 结果

3.1 4种生境凋落物中节肢动物群落结构

4种生境共捕获节肢动物17,466头, 隶属8纲18目, 4种生境的优势类群皆为蜚蠊目和啮目(附录1)。

林地生境共捕获节肢动物3,136头, 隶属7纲16目。其中, 处理组捕获1,698头, 占总捕获量的54.15%; 对照组捕获1,438头, 占总捕获量的45.85%。从节肢动物群落结构看, 处理组优势类群为蜚蠊目与啮目, 常见类群为蜘蛛目、弹尾目与膜翅目, 其余为稀有类群; 对照组优势类群为蜚蠊目与啮目, 常见类群为弹尾目、鞘翅目、双翅目与膜翅目, 其余为稀有类群。处理组除啮目相对多度略小于对照组外, 其余优势类群与常见类群相对多度均大于对照组, 且蜘蛛目在处理组中为常见类群, 而在对照组中为稀有类群。

农田生境共捕获节肢动物3,043头, 隶属5纲14

目。其中, 处理组捕获1,838头, 占总捕获量的60.40%; 对照组捕获1,205头, 占总捕获量的39.60%。从节肢动物群落结构看, 处理组优势类群为蜚蠊目与啮目, 常见类群为蜘蛛目、弹尾目、膜翅目、鞘翅目与双翅目, 其余为稀有类群。对照组中, 优势类群为蜚蠊目与啮目, 常见类群为蜘蛛目、弹尾目与膜翅目, 其余为稀有类群。处理组蜚蠊目、蜘蛛目、弹尾目的相对多度略小于对照组, 其余优势类群与常见类群的相对多度均大于对照组。

荒地生境共捕获节肢动物4,790头, 隶属7纲17目。其中, 处理组捕获2,631头, 占总捕获量的54.93%; 对照组捕获2,159头, 占总捕获量的45.07%。从节肢动物群落结构看, 处理组与对照组的优势类群均为蜚蠊目与啮目, 常见类群均为蜘蛛目、弹尾目与膜翅目, 其余为稀有类群。处理组中优势类群与常见类群相对多度均大于对照组。

沟渠生境共捕获节肢动物6,497头, 隶属6纲15目。其中, 处理组捕获3,413头, 占总捕获量的52.53%; 对照组捕获3,084头, 占总捕获量的47.47%。从节肢动物群落结构看, 处理组优势类群为蜚蠊目与啮目, 常见类群为蜘蛛目、弹尾目、等足目与膜翅目, 其余为稀有类群; 对照组优势类群为蜚蠊目与啮目, 常见类群为蜘蛛目、弹尾目与膜翅目, 其余为稀有类群。处理组中优势类群与常见类群相对多度均大于对照组, 且等足目在处理组中为常见类群, 而在对照组中为稀有类群。

3.2 4种生境中凋落物分解速率与节肢动物数量变化动态

林地生境中凋落物的分解动态与节肢动物数量变化动态见图1-a。2015年7–9月, 处理组与对照组凋落物月净损失率较高($L_n > 10\%$), 处理组($L_n = 12.90\%$)与对照组($L_n = 11.63\%$)均在7月达最高值, 8月份处理组凋落物月净损失率显著高于对照组($P = 0.008$), 其余月份差异不显著。2015年12月处理组累积损失率达97.10%, 对照组累积损失率达93.83%, 凋落物基本分解完毕。处理组与对照组节肢动物个体数在2015年7–9月到达一个高峰, 处理组(392头)与对照组(290头)均在8月达最高值, 7月与8月处理组数量显著高于对照组($P = 0.039$; $P = 0.001$), 且处理组节肢动物总数量高于对照组。林地生境月净损失率与节肢动物数量变化动态呈极显著相关($P < 0.01$), 相关系数为0.910。由上述结果可知, 在林地

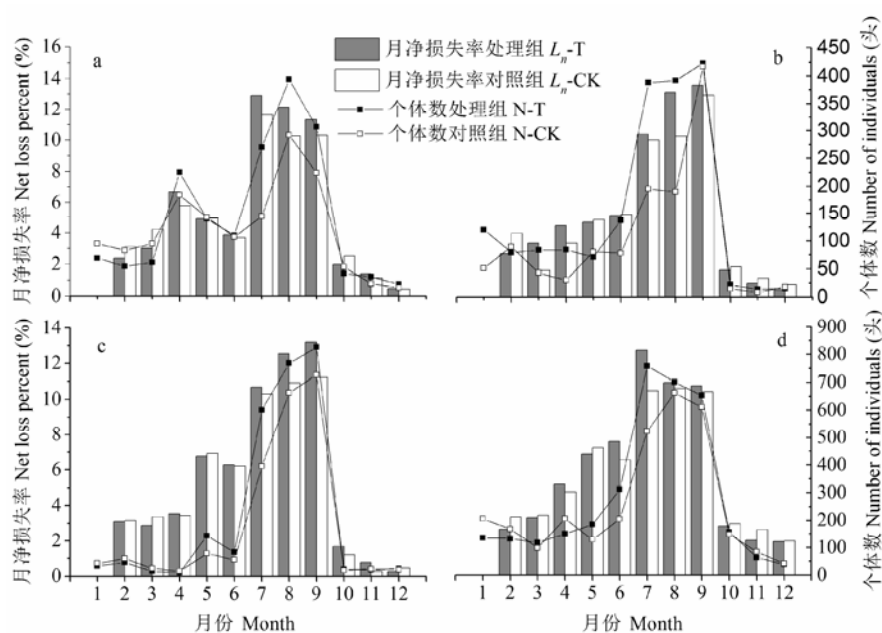


图1 4种生境凋落物月净损失率与节肢动物数量变化动态。a: 林地生境; b: 农田生境; c: 荒地生境; d: 沟渠生境。

Fig. 1 Dynamic of net loss percent of litter and the number of arthropods in four habitats. a, Forestland habitat; b, Cultivated field habitat; c, Uncultivated land habitat; d, Ditch habitat.

生境中, 分解较快的处理组凋落物中节肢动物数量高于分解较慢的对照组凋落物。

农田生境中凋落物的分解动态与节肢动物数量变化动态见图1-b。由图可知, 2015年7-9月, 处理组与对照组凋落物月净损失率较高($L_n > 10\%$), 处理组($L_n = 13.63\%$)与对照组($L_n = 13.00\%$)均在9月达到最高值, 且8月两者间达到显著差异($P = 0.028$), 其余月份差异不显著。2015年12月处理组累积损失率达96.73%, 对照组累积损失率达92.27%, 凋落物基本分解完毕。处理组与对照组节肢动物个体数高峰均在2015年7-9月, 处理组(423头)与对照组(417头)均在9月达最高值, 7月与8月两者间达到显著差异($P = 0.015$; $P = 0.003$), 且处理组节肢动物总数量高于对照组。农田生境凋落物月净损失率与节肢动物数量变化达到极显著相关($P < 0.01$), 相关系数为0.949。由上述结果可知, 在农田生境中, 分解较快的处理组凋落物中的节肢动物数量高于分解较慢的对照组凋落物。

荒地生境凋落物的分解动态与节肢动物数量变化动态见图1-c, 由图可知, 2015年7-9月, 处理组与对照组凋落物月净损失率较高($L_n > 10\%$), 处理组($L_n = 13.20\%$)与对照组($L_n = 11.57\%$)均在9月达到

最高值, 在8月份与9月份的调查中处理组显著高于对照组($P = 0.001$; $P = 0.001$)。2015年12月处理组累积损失率达99.07%, 对照组累积损失率达97.67%, 凋落物基本分解完毕。处理组与对照组节肢动物个体数高峰均在2015年7-9月, 处理组(830头)与对照组(730头)均在9月达最高值, 在7月份与8月份的调查中处理组显著高于对照组($P = 0.015$; $P = 0.033$), 且处理组节肢动物总数量高于对照组。荒地生境凋落物月净损失率与节肢动物数量变化动态达到极显著相关($P < 0.01$), 相关系数为0.909。由上述结果可知, 在荒地生境中, 分解较快的处理组凋落物中的节肢动物数量高于分解较慢的对照组凋落物。

沟渠生境凋落物的分解动态和节肢动物数量变化动态见图1-d。由图可知, 2015年7-9月, 处理组与对照组凋落物月净损失率较高($L_n > 10\%$), 处理组在7月达到最高值($L_n = 12.60\%$), 对照组在8月达到最高值($L_n = 10.30\%$), 且在7月份的调查中处理组显著高于对照组($P = 0.003$), 其余月份差异不显著。2015年12月处理组累积损失率达96.60%, 对照组累积损失率达90.80%, 凋落物基本分解完毕。处理组与对照组节肢动物个体数高峰均在2015年7-9月, 处理组在7月(758头)达最高值, 对照组在8月

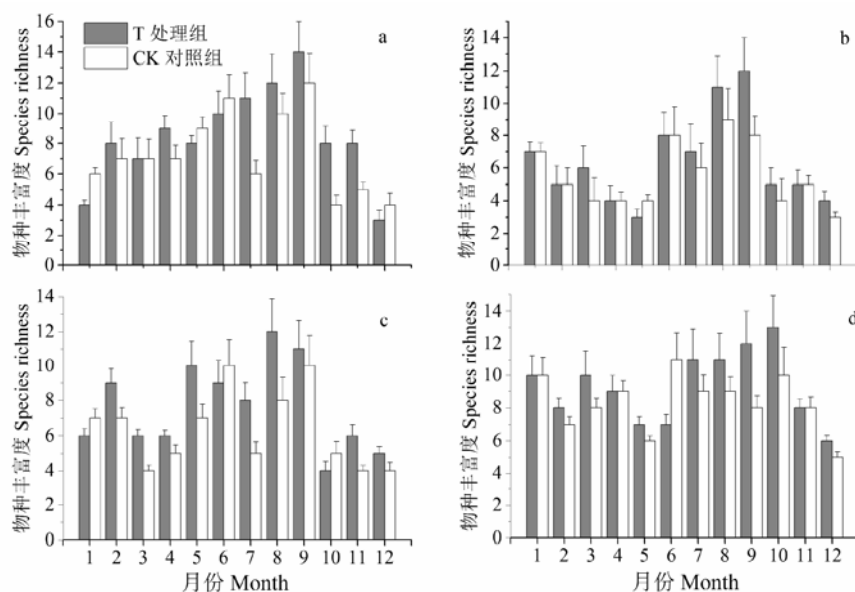


图2 4种生境节肢动物丰富度周年变化。a: 林地生境; b: 农田生境; c: 荒地生境; d: 沟渠生境。

Fig. 2 Annual variation of species richness of arthropod in four habitats. a, Forestland habitat; b, Cultivated field habitat; c, Uncultivated land habitat; d, Ditch habitat.

(663头)达最高值,在6月份与7月份的调查中处理组均显著高于对照组($P = 0.031$; $P = 0.011$),且处理组节肢动物总数量高于对照组。沟渠生境凋落物月净损失率与节肢动物数量达到极显著相关($P < 0.01$),相关系数为0.938。由上述结果可知,在沟渠生境中,分解较快的处理组凋落物中的节肢动物数量高于分解较慢的对照组凋落物。

3.3 4种生境中节肢动物群落多样性

林地生境节肢动物丰富度周年变化见图2-a,在7月以前的6次调查中,处理组与对照组的丰富度并无显著差异,而7月及以后的调查中处理组的丰富度均高于对照组,并且在7月的调查中达到显著差异($P = 0.089$)。节肢动物多样性指数变化动态如图3-a所示,处理组多样性指数均高于对照组,并且Shannon-Wiener多样性指数($P = 0.039$)、Simpson多样性指数($P = 0.034$)、Pielou均匀度指数($P = 0.032$)在10月份均达到显著差异。上述结果表明,黄顶菊入侵林地生境后随着凋落物的分解节肢动物群落的多样性升高了。

农田生境节肢动物丰富度变化动态见图2-b,多数月份的调查显示处理组的节肢动物丰富度高于对照组,并且在9月的调查中达到显著差异($P = 0.004$)。节肢动物多样性指数变化动态如图3-b所示,在9月份的调查中处理组的Shannon-Wiener多样性

指数($P = 0.030$)、Simpson多样性指数($P = 0.028$)均显著高于对照组。上述结果表明,黄顶菊入侵农田生境后随着凋落物的分解节肢动物多样性升高。

荒地生境节肢动物丰富度变化动态见图2-c,处理组节肢动物丰富度基本高于对照组,并且在7月($P = 0.004$)与8月($P = 0.005$)的调查中达到显著差异。节肢动物多样性指数变化动态如图3-c所示,大多数月份的调查显示处理组节肢动物多样性指标高于对照组,并且在8月份调查中处理组的Simpson多样性指数($P = 0.024$)显著高于对照组。上述结果表明,黄顶菊入侵荒地生境后随着凋落物的分解节肢动物的多样性升高。

沟渠生境节肢动物丰富度变化动态见图2-d,大多数月份的调查显示处理组节肢动物丰富度高于对照组,并且在9月($P = 0.005$)的调查中达到显著差异。节肢动物多样性指数变化动态如图3-d所示,在7月份的调查中处理组的Pielou均匀度指数($P = 0.034$)显著高于对照组。上述结果表明,黄顶菊入侵沟渠生境后随着凋落物的分解节肢动物多样性升高。

4 讨论

本研究通过对黄顶菊凋落物中节肢动物群落的调查,发现黄顶菊的入侵导致节肢动物总个体数量与多样性指数升高,这与刘宁等(2014)采用陷阱

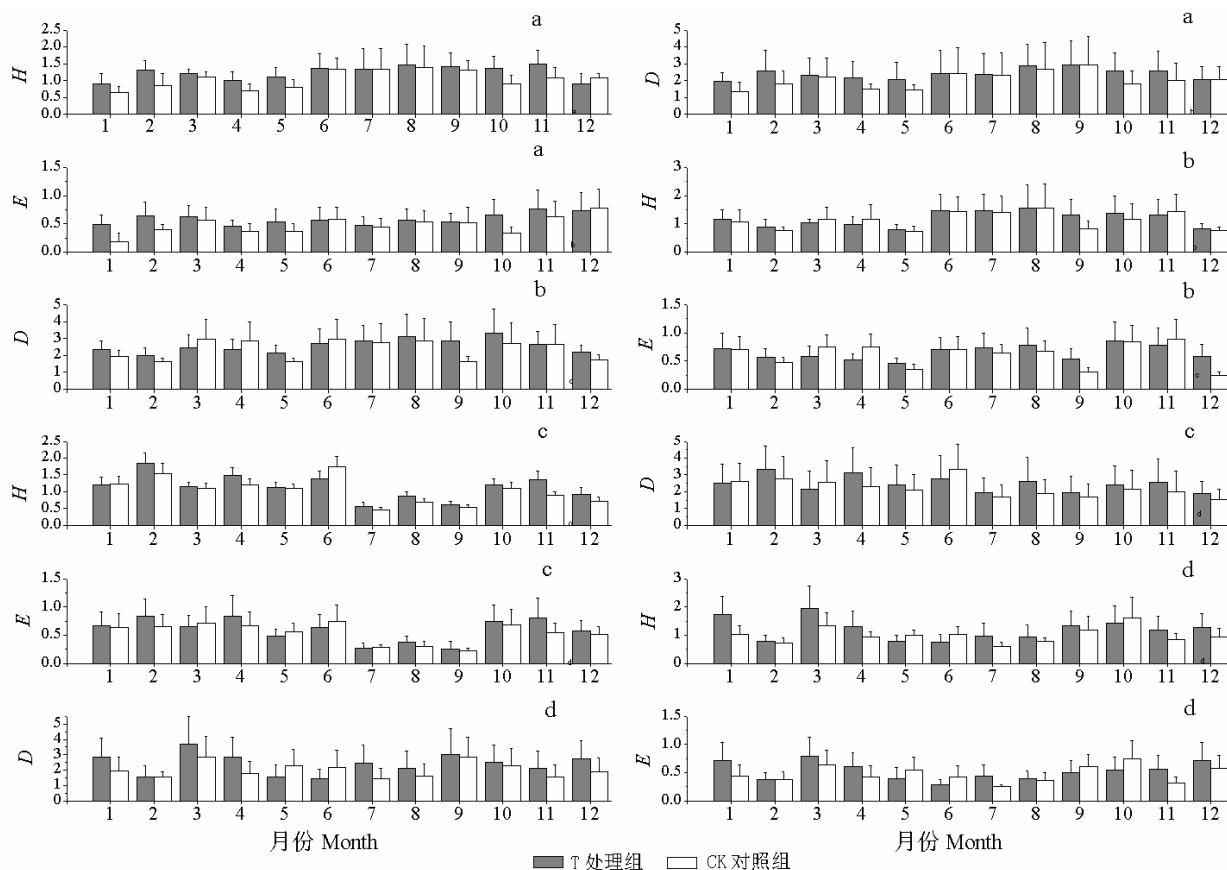


图3 4种生境节肢动物多样性。H: Shannon-Wiener多样性指数; D: Simpson多样性指数; E: Pielou均匀度指数。a: 林地生境; b: 农田生境; c: 荒地生境; d: 沟渠生境。

Fig. 3 Diversity index of arthropods in four habitats. H, Shannon-Wiener diversity index; D, Simpson-Yule index; E, Pielou evenness index. a, Forestland habitat; b, Cultivated field habitat; c, Uncultivated land habitat; d, Ditch habitat.

法调查黄顶菊地表土壤动物群落结构的结果类似。其他入侵植物种类的调查也出现过类似的结果, 如 Lana和Guiss等(1991)调查了互花米草(*Spartina alterniflora*)入侵巴西东南部海湾盐沼后土壤动物群落在14个月内的时空变化, 发现由于互花米草增加了植被覆盖度及凋落物, 引起了土壤动物密度以及腹足类和等足类类群数的升高。

本研究分析发现黄顶菊入侵后对节肢动物群落结构及多样性有一定的影响, 该影响与黄顶菊生长情况、凋落物分解速率有关。黄顶菊在7月份达到生长旺期, 植株高大, 植被密集, 林下形成弱光、高温、潮湿的小气候环境, 而高温潮湿环境中节肢动物数量更丰富(Palacios-Vargas et al, 2007; Darby et al, 2011), 因此黄顶菊通过为节肢动物的生存及繁衍提供更适宜的栖息环境来增加其个体数量。同时, 高温潮湿的环境能加速凋落物的分解, 凋落物分解初期并不适合节肢动物定殖, 土壤动物会选择

凋落物适合取食时定殖(Schulze & Walker, 1997)。在整个研究过程中, 处理组与对照组凋落物分解最快时段均为7-9月, 节肢动物数量最高峰也在7-9月。节肢动物对凋落物的摄食以及排泄, 直接或间接粉碎凋落物, 并通过影响微生物群落结构调控凋落物分解, 因此节肢动物的增加也加速了凋落物的分解(Bokhorst & Wardle, 2013; García-Palacios et al, 2013; Zhang et al, 2015)。并且分解较快的黄顶菊凋落物中的节肢动物数量高于分解较慢的对照植物凋落物, 这与以往的研究一致(Barajas-Guzmán & Alvarez-Sánchez, 2003; 查同刚等, 2012)。

黄顶菊入侵后对节肢动物群落结构及多样性的影响还与生境内的人为干扰有关, 干扰程度较轻、植被覆盖稳定的生境条件更有利于中小型土壤动物的生存(秦钟等, 2009; Thakur et al, 2014)。本研究结果显示林地与农田生境内的节肢动物数量低于荒地与沟渠生境, 且林地与农田生境内处理组的

节肢动物优势类群出现小于对照组的现象,而荒地与沟渠生境处理组的节肢动物优势类群与常见类群皆大于对照组。出现此差异的原因可能是林地与农田生境存在较多的农业活动,植被保持稳定时间较短,这都无助于节肢动物多样性的提高。而沟渠与荒地生境受人类活动干扰较少,植被保持稳定时间长,节肢动物群落受扰动小,因此黄顶菊在这两种生境中对节肢动物多样性的影响更大。

致谢: 感谢柏超师姐对英文摘要的悉心修改,感谢张婷、黄成成在实验采样时的帮助。

参考文献

- Barajas-Guzmán G, Alvarez-Sánchez J (2003) The relationships between litter fauna and rates of litter decomposition in a tropical rain forest. *Applied Soil Ecology*, 24, 91–100.
- Bokhorst S, Wardle DA (2013) Microclimate within litter bags of different mesh size: implications for the ‘arthropods effect’ on litter decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*, 58, 147–152.
- Chen HL, Li YJ, Li B, Chen JK, Wu JH (2005) Impacts of exotic plant invasions on soil biodiversity and ecosystem processes. *Biodiversity Science*, 13, 555–565. (in Chinese with English abstract) [陈慧丽, 李玉娟, 李博, 陈家宽, 吴纪华 (2005) 外来植物入侵对土壤生物多样性和生态系统过程的影响. *生物多样性*, 13, 555–565.]
- Chen W, Li T, Zheng RQ, Chen P, Li T, Lu JJ, Zhang JY (2012) Effects of the invasion by *Solidago canadensis* L. on the community structure of soil animals. *Acta Ecologica Sinica*, 32, 7072–7081. (in Chinese with English abstract) [陈雯, 李涛, 郑荣泉, 陈平, 李婷, 陆俊佳, 张加勇 (2012) 加拿大一枝黄花入侵对土壤动物群落结构的影响. *生态学报*, 32, 7072–7081.]
- Cui Y, Wang SL, Yu XJ, Yan SK (2012) Effects of forest soil animals on early decomposition and nutrient release of litter. *Chinese Journal of Ecology*, 31, 2709–2715. (in Chinese with English abstract) [崔洋, 汪思龙, 于小军, 颜绍堃 (2012) 森林土壤动物对凋落物早期分解及养分释放的影响. *生态学杂志*, 31, 2709–2715.]
- Cui ZD (1985) Function of soil animals. *Chinese Journal of Zoology*, 20(2), 49–52. (in Chinese) [崔振东 (1985) 土壤动物的作用. *动物学杂志*, 20(2), 49–52.]
- Darby BJ, Neher DA, Housman DC, Belnap J (2011) Few apparent short-term effects of elevated soil temperature and increased frequency of summer precipitation on the abundance and taxonomic diversity of desert soil micro- and meso-fauna. *Soil Biology and Biochemistry*, 43, 1474–1481.
- Gao XM, Tang TG, Liang Y, Zheng TX, Sang WG, Chen YL (2004) An alert regarding biological invasion by a new exotic plant, *Flaveria bidentis*, and strategy for its control. *Biodiversity Science*, 12, 274–279. (in Chinese with English abstract) [高贤明, 唐廷贵, 梁宇, 郑天翔, 桑卫国, 陈艺林 (2004) 外来植物黄顶菊的入侵警报及防控对策. *生物多样性*, 12, 274–279.]
- García-Palacios P, Maestre FT, Kattge J, Wall DH (2013) Climate and litter quality differently modulate the effects of soil fauna on litter decomposition across biomes. *Ecology Letters*, 16, 1045–1053.
- Huangfu CH, Wang ZY, Yang DL (2009) Basic photosynthetic characteristics of exotic invasive weed *Flaveria bidentis* and its companion species. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 29, 781–788. (in Chinese with English abstract) [皇甫超河, 王志勇, 杨殿林 (2009) 外来入侵种黄顶菊及其伴生植物光合特性初步研究. *西北植物学报*, 29, 781–788.]
- Lana PC, Guiss C (1991) Influence of *Spartina alterniflora* on structure and temporal variability of macrobenthic associations in a tidal flat of Paranaguá Bay (southeastern Brazil). *Marine Ecology Progress Series*, 73, 231–244.
- Lei YB, Xiao HF, Feng YL (2010) Impacts of alien plant invasions on biodiversity and evolutionary responses of native species. *Biodiversity Science*, 18, 622–630. (in Chinese with English abstract) [类延宝, 肖海峰, 冯玉龙 (2010) 外来植物入侵对生物多样性的影响及本地生物的进化响应. *生物多样性*, 18, 622–630.]
- Li HX, Sui JZ, Zhou SX (1987) Index of Insect Classification. China Agriculture Press, Beijing. (in Chinese) [李鸿兴, 隋敬之, 周士秀 (1987) 昆虫分类检索. 农业出版社, 北京.]
- Li YH (2012) Decomposition Characteristics and Soil Fauna Community Dynamics in Mixed *Eucalyptus grandis* and *Alnus formosana* Litters. PhD dissertation, Sichuan Agricultural University, Ya'an. (in Chinese with English abstract) [李艳红 (2012) 巨桉-台湾桉木混合凋落物分解特征及其土壤动物群落动态. 博士学位论文, 四川农业大学, 雅安.]
- Liu N, Fu WD, Zhang GL, Liu YS, Lu AL (2014) Impacts of *Flaveria bidentis* invasion on ground-dwelling soil animal communities in different habitats. *Chinese Journal of Ecology*, 33, 176–183. (in Chinese with English abstract) [刘宁, 付卫东, 张国良, 刘玉升, 卢爱玲 (2014) 黄顶菊入侵对不同生境地表土壤动物群落的影响. *生态学杂志*, 33, 176–183.]
- Liu QR (2005) *Flaveria* Juss. (Compositae), a newly naturalized genus in China. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 43, 178–180. (in Chinese with English abstract) [刘全儒 (2005) 中国菊科植物一新归化属——黄菊属. *植物分类学报*, 43, 178–180.]
- Mack RN, Simberloff D, Mark LW, Evans H, Clout M, Bazzaz FA (2000) Biotic invasions: causes, epidemiology, global consequences and control. *Ecological Applications*, 10, 689–710.
- Ma KP (1994) Measurement of biotic community diversity. I. a

- diversity (Part 1). Chinese Biodiversity, 2, 162–168. (in Chinese) [马克平 (1994) 生物群落多样性的测度方法. I. α 多样性的测度方法(上). 生物多样性, 2, 162–168.]
- Palacios-Vargas JG, Castaño-Meneses G, Gómez-Anaya JA, Martínez-Yrizar A, Mejía-Recamier BE, Martínez-Sánchez J (2007) Litter and soil arthropods diversity and density in a tropical dry forest ecosystem in Western Mexico. Biodiversity and Conservation, 16, 3703–3717.
- Pielou EC (1975) Ecological Diversity. John Wiley and Sons, New York.
- Qin Z, Zhang JE, Li QF (2009) Community structure of soil meso- fauna and micro- fauna in different habitats of urbanized region. Chinese Journal of Applied Ecology, 20, 3049–3056. (in Chinese with English abstract) [秦钟, 章家恩, 李庆芳 (2009) 城市化地区不同生境下中小型土壤动物群落结构特征. 应用生态学报, 20, 3049–3056.]
- Ren YP, Jiang S, Gu S, Wang YZ, Zheng SX (2008) Advances in *Flaveria bidentis* (L.) Kuntze, a new exotic plant. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 16, 390–396. (in Chinese with English abstract) [任艳萍, 江莎, 古松, 王永周, 郑书馨 (2008) 外来植物黄顶菊(*Flaveria bidentis*)的研究. 热带亚热带植物学报, 16, 390–396.]
- Schulze DJ, Walker KF (1997) Riparian eucalypts and willows and their significance for aquatic invertebrates in the River Murray, South Australia. Regulated Rivers: Research & Management, 13, 557–577.
- Shannon CE, Weaver W (1949) The Mathematical Theory of Communication. University of Illinois Press, Urbana.
- Simpson EH (1949) Measurement of diversity. Nature, 162, 688.
- Tan B, Wu FZ, Yang WQ, Xia L, Yang YL, Wang A (2012) Diversity of the large soil animal communities and its response to seasonal freezing and thawing in the subalpine / alpine forests. Biodiversity Science, 20, 215–223. (in Chinese with English abstract) [谭波, 吴福忠, 杨万勤, 夏磊, 杨玉莲, 王奥 (2012) 川西亚高山/高山森林大型土壤动物群落多样性及其对季节性冻融的响应. 生物多样性, 20, 215–223.]
- Thakur MP, Berg MP, Eisenhauer N, van Langevelde F (2014) Disturbance–diversity relationships for soil fauna are explained by faunal community biomass in a salt marsh. Soil Biology and Biochemistry, 78, 30–37.
- Wan FH, Guo JY, Wang DH (2002) Alien invasive species in China: their damages and management strategies. Biodiversity Science, 10, 119–125. (in Chinese with English abstract) [万方浩, 郭建英, 王德辉 (2002) 中国外来入侵生物的危害与管理对策. 生物多样性, 10, 119–125.]
- Wood CT, Schlindwein CCD, Soares GLG, Araujo PB (2012) Feeding rates of *Balloniscus sellowii* (Crustacea, Isopoda, Oniscidea): the effect of leaf litter decomposition and its relation to the phenolic and flavonoid content. ZooKeys, 176, 231–245.
- Xie JF, Quan GM, Zhang JE, Mao DJ, Xu HQ, Qin Z (2011) Effects of *Ambrosia artemisiifolia* invasion on the community structure of meso- and micro-fauna. Acta Ecologica Sinica, 31, 5682–5690. (in Chinese with English abstract) [谢俊芳, 全国明, 章家恩, 毛丹鹃, 徐华勤, 秦钟 (2011) 豚草入侵对中小型土壤动物群落结构特征的影响. 生态学报, 31, 5682–5690.]
- Yin WY (1998) Pictorial Keys of Soil Animals of China. Science Press, Beijing. (in Chinese) [尹文英 (1998) 中国土壤动物检索图鉴. 科学出版社, 北京.]
- Zha TG, Zhang ZQ, Sun G, Wang GM, Yun XQ, Wang YK, Liu Y (2012) Home-field advantage of litter decomposition and its soil biological driving mechanism: a review. Acta Ecologica Sinica, 32, 7991–8000. (in Chinese with English abstract) [查同刚, 张志强, 孙阁, 王高敏, 负小琴, 王伊琨, 刘艳 (2012) 凋落物分解主场效应及其土壤生物驱动. 生态学报, 32, 7991–8000.]
- Zhang GL, Fu WD, Sun YF (2013) Manual of National Comprehensive Prevention and Control Technology for the State Key Management of Alien Invasive Species. China Agriculture Press, Beijing. (in Chinese) [张国良, 付卫东, 孙玉芳 (2013) 国家重点管理外来入侵物种综合防控技术手册. 中国农业出版社, 北京.]
- Zhang GL, Fu WD, Zheng H (2014) Invasion Mechanisms and Integrated Management of *Flaveria bidentis*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [张国良, 付卫东, 郑浩 (2014) 黄顶菊入侵机制及综合治理. 科学出版社, 北京.]
- Zhang GL, Fu WD, Han Y (2010) Emergency Prevention and Control Guidelines of *Flaveria bidentis* (L.) Kuntze. Science Press, Beijing. (in Chinese) [张国良, 付卫东, 韩颖 (2010) 黄顶菊应急防控指南. 科学出版社, 北京.]
- Zhang TR, Huangfu CH, Bai XM, Yang DL, Li G, Lai X, Zhao JN (2010) Effect of *Flaveria bidentis* invasion on soil nutrients and enzyme activities. Chinese Journal of Ecology, 29, 1353–1358. (in Chinese with English abstract) [张天瑞, 皇甫超河, 白小明, 杨殿林, 李刚, 赖欣, 赵建宁 (2010) 黄顶菊入侵对土壤养分和酶活性的影响. 生态学杂志, 29, 1353–1358.]
- Zhang W, Yuan S, Hu N, Lou Y, Wang S (2015) Predicting soil fauna effect on plant litter decomposition by using boosted regression trees. Soil Biology and Biochemistry, 82, 81–86.

(责任编辑: 万方浩 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附录1 4种生境节肢动物群落结构

Appendix 1 Community structure of arthropods in four habitats

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016047-1.pdf>

晏静, 张国良, 张瑞海, 宋振, 赵晓红, 刘玉升, 付卫东. 黄顶菊凋落物分解对节肢动物群落结构的影响. 生物多样性, 2016, **24** (11): 1288–1295.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016047>

附录1 4种生境节肢动物群落结构
Appendix 1 Community structure of arthropods in four habitats

类群 Taxa	林地生境 Forestland habitats				农田生境 Cultivated field habitats				荒地生境 Uncultivated land habitats				沟渠生境 Ditch habitats			
	处理组 Treatment		对照组 Control		处理组 Treatment		对照组 Control		处理组 Treatment		对照组 Control		处理组 Treatment		对照组 Control	
	个体数 Individ- uals	相对多度 Relative abundance	个体数 Individuals	相对多度 Relative abundance	个体数 Individuals	相对多度 Relative abundance	个体数 Individuals	相对多度 Relative abundance	个体数 Individuals	相对多度 Relative abundance	个体数 Individuals	相对多度 Relative abundance	个体数 Individuals	相对多度 Relative abundance	个体数 Individuals	相对多度 Relative abundance
蜚蠊目 Arachnoidea	1,036	61.01	793	55.15	1,100	59.85	757	62.82	1,882	71.53	1,540	71.33	2,060	60.36	1,860	60.31
蜘蛛目 Araneae	42	2.47	9	0.63	59	3.21	43	3.57	36	1.42	30	1.39	66	1.93	54	1.75
弹尾目 Collembola	107	6.3	88	6.12	49	2.67	56	4.65	243	9.24	197	9.12	311	9.11	272	8.82
石蜈蚣目 Lithobiomorpha	1	0.06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
柄眼目Stylommatophora	1	0.06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
等足目 Isopoda	9	0.53	4	0.28	3	0.16	7	0.58	6	0.23	4	0.19	35	1.03	30	0.97
双尾目 Entotrophi	7	0.41	10	0.7	3	0.16	0	0	0	0	3	0.14	1	0.03	1	0.03
综合目 Symphyla	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0.08	0	0	1	0.03	0	0
石蜈蚣目Lithobiomorpha	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.05	0	0	0	0
啮目 Psocoptera	359	21.14	398	27.68	504	27.42	288	23.9	320	12.16	262	12.14	739	21.65	665	21.56
啮科 Psocidae	359	21.14	398	27.68	504	27.42	288	23.9	320	12.16	262	12.14	739	21.65	665	21.56
同翅目 Homoptera	2	0.12	6	0.42	0	0	0	0	9	0.34	0	0	2	0.06	0	0
红蚧科 Kermesidae	2	0.12	0	0	0	0	0	0	9	0.34	0	0	2	0.06	0	0
半翅目 Hemiptera	7	0.41	16	0.98	7	0.38	7	0.58	28	1.06	23	1.06	14	0.41	30	0.97
蝽科 Pentatomidae	5	0.29	7	0.49	7	0.38	4	0.33	16	0.61	16	0.74	11	0.32	21	0.68
长蝽科 Lygaeidae	0	0	0	0	0	0	1	0.08	11	0.42	5	0.23	2	0.06	7	0.23
花蝽科 Anthocoridae	0	0	2	0.14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
红蝽科 Pyrrhocoridae	2	0.12	5	0.35	0	0	2	0.17	1	0.04	2	0.09	1	0.03	2	0.06
鞘翅目 Coleoptera	17	1.01	20	1.39	19	1.03	9	0.75	8	0.3	12	0.56	23	0.67	29	0.94
黑鳃科 Passalidae	3	0.18	0	0	1	0.05	0	0	0	0	0	0	1	0.03	0	0
象甲科 Curculionidae	1	0.06	0	0					0	0	1	0.05	3	0.09	2	0.06
拟步甲科 Tenebrionidae	0	0	0	0	1	0.05	0	0	0	0	0	0	3	0.09	1	0.03

类群 Taxa	林地生境 Forestland habitats				农田生境 Cultivated field habitats				荒地生境 Uncultivated land habitats				沟渠生境 Ditch habitats			
	处理组 Treatment		对照组 Control		处理组 Treatment		对照组 Control		处理组 Treatment		对照组 Control		处理组 Treatment		对照组 Control	
	个体数	相对多度	个体数	相对多度	个体数	相对多度	个体数	相对多度	个体数	相对多度	个体数	相对多度	个体数	相对多度	个体数	相对多度
	Individuals	Relative abundance	Individuals	Relative abundance	Individuals	Relative abundance	Individuals	Relative abundance	Individuals	Relative abundance	Individuals	Relative abundance	Individuals	Relative abundance	Individuals	Relative abundance
叶甲科 Chrysomelidae	0	0	1	0.07	0	0	1	0.08	0	0	0	0	0	0	0	0
瓢甲科 Coccinellidae	0	0	1	0.07	0	0	1	0.08	0	0	0	0	0	0	0	0
苔甲科 Scydmaenidae	9	0.53	11	0.76	6	0.33	6	0.5	7	0.27	3	0.14	8	0.23	9	0.29
出尾罩甲科 Scaphidiidae	1	0.06	1	0.07	1	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
谷盗科 Ostomatidae	0	0	0	0	0	0	1	0.08	0	0	0	0	0	0	0	0
小罩甲科	2	0.12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mycetophagidae																
鞘翅目幼虫 Coleoptera	1	0.06	6	0.42	10	0.54	0	0	1	0.04	8	0.37	8	0.23	17	0.55
双翅目 Diptera	12	0.7	18	1.25	19	1.03	4	0.33	8	0.3	20	0.93	24	0.72	30	0.97
瘿蚊科 Cecidomyiidae	6	0.35	5	0.35	7	0.38	3	0.25	4	0.15	7	0.32	7	0.21	8	0.26
蚊科 Culicidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0.18	14	0.45
大蚊科 Tipulidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.05	2	0.06	3	0.1
秆蝇科 Chloropidae	1	0.06	0	0	0	0	0	0	1	0.04	0	0	1	0.03	0	0
食蚜蝇科 Syrphidae	0	0	1	0.07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
水虻幼虫 Stratiomyidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0.06	0	0
双翅目幼虫 Diptera	5	0.29	12	0.83	12	0.65	1	0.08	3	0.11	12	0.56	6	0.18	5	0.16
膜翅目 Hymenoptera	70	4.12	59	4.1	60	3.26	26	2.16	70	2.67	40	1.85	92	2.7.0	75	2.43
蚁科 Formicidae	51	3	42	2.92	34	1.85	11	0.91	47	1.79	24	1.11	59	1.73	41	1.32
蜜蜂科 Apidae	1	0.06	0	0	0	0	0	0	3	0.11	1	0.05	1	0.03	0	0
金小蜂科 Pteromalidae	15	0.88	13	0.9	26	1.41	14	1.16	15	0.57	14	0.65	23	0.67	29	0.94
姬蜂科 Ichneumonidae	1	0.06	4	0.28	0	0	0	0	1	0.04	0	0	2	0.06	0	0
叶蜂科 Tenthredinidae	1	0.06	0	0	0	0	0	0	2	0.08	1	0.05	4	0.12	5	0.16
茧蜂科 Braconidae	1	0.06	0	0	0	0	1	0.08	0	0	0	0	1	0.03	0	0
蚜小蜂科 Aphelinidae	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.04	0	0	2	0.06	0	0
缨小蜂科 Mymaridae	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.04	0	0	0	0	0	0
缨翅目 Thysanoptera	16	0.94	8	0.56	9	0.49	4	0.33	11	0.42	20	0.93	30	0.88	8	0.26
管蓟马科 Phlaeothripidae	16	0.94	8	0.56	9	0.49	4	0.33	11	0.42	20	0.93	30	0.88	8	0.26
蜚蠊目 Blattaria	5	0.3	1	0.07	1	0.05	4	0.33	3	0.11	0	0	1	0.03	10	0.32

类群 Taxa	林地生境 Forestland habitats				农田生境 Cultivated field habitats				荒地生境 Uncultivated land habitats				沟渠生境 Ditch habitats			
	处理组 Treatment		对照组 Control		处理组 Treatment		对照组 Control		处理组 Treatment		对照组 Control		处理组 Treatment		对照组 Control	
	个体数 Individuals	相对多度 Relative abundance	个体数 Individuals	相对多度 Relative abundance	个体数 Individuals	相对多度 Relative abundance	个体数 Individuals	相对多度 Relative abundance	个体数 Individuals	相对多度 Relative abundance	个体数 Individuals	相对多度 Relative abundance	个体数 Individuals	相对多度 Relative abundance	个体数 Individuals	相对多度 Relative abundance
蜚蠊科Blattidae	2	0.12	0	0	1	0.05	4	0.33	3	0.11	0	0	1	0.03	10	0.32
蜚蠊目幼虫 Blattaria	3	0.18	1	0.07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
鳞翅目 Lepidoptera	7	0.41	10	0.7	4	0.22	0	0	3	0.11	7	0.32	14	0.41	20	0.65
鳞翅目幼虫 Lepidoptera	7	0.41	10	0.7	4	0.22	0	0	3	0.11	7	0.32	14	0.41	20	0.65
脉翅目 Neuroptera	0	0	0	0	1	0.05	0	0	2	0.08	0	0	0	0	0	0
草蛉科幼虫 Chrysopidae	0	0	0	0	1	0.05	0	0	2	0.08	0	0	0	0	0	0
总计 Total	1,698		1,438		1,838		1,205		2,631		2,159		3,413		3,084	