

DOI: 10.5846/stxb201801240187

白耀宇, 庞帅, 殷禄燕, 宋艾妮, 祝增荣. 冬水田典型生境类型节肢动物群落多样性及生物量特征. 生态学报, 2018, 38(23): - .

Bai Y Y, Pang S, Yin L Y, Song A N, Zhu Z R. Arthropod species diversity and biomass of fallow waterlogged paddy fields in Chongqing, China. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(23): - .

冬水田典型生境类型节肢动物群落多样性及生物量特征

白耀宇^{1,*}, 庞 帅¹, 殷禄燕¹, 宋艾妮¹, 祝增荣²

¹ 西南大学植物保护学院, 重庆 400715

² 水稻生物学国家重点实验室, 农业部作物病虫分子生物学重点开放实验室, 浙江大学昆虫科学研究所, 杭州 310058

摘要: 为了掌握休耕季节不同生境冬水田节肢动物群落多样性及生物量特征, 于 2017 年 2—4 月在重庆市璧山区通过陷阱法对 3 类冬水田耕作区及期 9 个小区生境进行了定点调查, 分别为水稻和蔬菜及荒地耕作区、水稻和蔬菜耕作区及水稻和林地耕作区。共捕获节肢动物 108367 只, 隶属于 3 纲 119 科(种)。Berger-Parker 优势度指数表明, 冬水田节肢动物群落以罕见或稀少种(类群)数量最多以及优势类群数量稀少且突出为最基本特征, 圆蛛科和长角蛛科是最主要的优势类群。节肢动物密度和生物量的百分比分析表明, 腐食者和捕食者是节肢动物群落的主要功能团; 弹尾虫以及不同种类蜘蛛和天敌昆虫类群分别构成了腐食者和捕食者中的主要类群(种)。3 类冬水田及其小区节肢动物群落主要功能团密度和生物量以及群落 Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Margalef 丰富度指数(D)、Pielou 均匀度指数(J)和 Simpson 优势集中性指数(C)均有明显的规律变化, 且出现了显著性差异($P < 0.05$); 节肢动物群落及其主要功能团腐食者和植食者分别在密度和生物量间, 以及捕食者与其猎物腐食者和植食者在生物量上都具显著的相关性($P < 0.05$)。群落相似性及相关性分析显示, 3 类冬水田及其小区节肢动物群落组成总体上差异明显, 显然受到了稻田生境及耕作/管理等非生物因素的影响; 其中生境类型(FH)作用最大, 其次是蓄水量(EWQ)、稻桩生物(BR)、种植模式(PP)和收割方式(HM); 它们与节肢动物群落密度及参数 H' 、 D 和 C , 以及腐食者密度和生物量、捕食者密度等显著正相关或负相关($P < 0.05$)。主成分及聚类分析结果进一步指出, 3 类冬水田的生境异质性差异较大, 这与它们小区在节肢动物群落密度(AI)、腐食者密度(DI)及 FH 等生物和非生物因素上的较大不同有关。总之, 3 类冬水田主要营养链“水稻秸秆-腐食者-捕食者”中存在不同程度的级联效应; 弹尾虫作为该效应中腐食者的代表承担着冬水田“关键或中心”节肢动物类群具有的双重生态功能; 不同冬水田及其小区节肢动物群落多样性及生物量特征差异明显, 这与 FH、EWQ、BR、PP 和 HM 等非生物因素密切相关。

关键词: 冬水田; 节肢动物群落; 生物量; 级联效应; 采后季节

Arthropod species diversity and biomass of fallow waterlogged paddy fields in Chongqing, China

BAI Yaoyu^{1,*}, PANG Shuai¹, YIN Luyan¹, SONG Aini¹, ZHU Zengrong²

¹ College of Plant Protection, Southwest University, Beibei, Chongqing 400715, China

² State Key Laboratory of Rice Biology, Ministry of Agriculture Key Laboratory of Molecular Biology of Crop Pathogens and Insects, Institute of Insect Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

Abstract: Fallow waterlogged paddy fields (FWPF) are special paddy fields that occur in autumn, winter, and spring during postharvest seasons in the hilly area of southern China. These have centuries-old history and are not only a cropping system to cultivate rice, but also a large-scale water storage system to irrigate paddy fields in case of drought in the coming

基金项目: 国家自然科学基金(31371935)

收稿日期: 2018-01-24; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yybai711@163.com

year. At present, FWPFs are distributed widely in Chongqing, southwestern China. Traditionally, after the rice harvest, rice farmers built dams and stored water in FWPFs, and the rice straw (stems with leaves) left in the field decayed as rice litter for the following rice season. However, FWPF cultivation practices raised concerns related to degradation about the relationship between the rice straw and arthropods, and among different functional arthropod groups in the paddy fields. In addition, some environmental factors should also be considered as they may influence these relationships, such as different tillage and harvesting methods, and the various degrees of disturbance related to human farming activities and environmental vegetation around FWPFs. To date, limited studies on such relationships and influences have been reported, especially in Chongqing. Therefore, this study aimed to: (1) analyze the correlation among the rice straw and different arthropod groups, and the community characteristics based on their individual numbers and biomass; (2) examine the effect of environmental factors on arthropod community parameters in different FWPF habitats; and (3) investigate the specific causes of the changes. In this study, field experiments were carried out from February to April at three locations in rice postharvest seasons of 2017 in Bishan County, Chongqing Municipality, which respectively represented three FWPF habitats and different methods of tillage and harvesting, including nine FWPF plots, i.e., mixed areas of rice, vegetables, and wasteland (RVW); mixed areas of rice and vegetables (RV), and mixed areas of rice and forestland (RF). Pitfall traps were used to capture 108,367 arthropod individuals, belonging to 94 families, representing five functional groups: detritivores, predators, phytophages, parasitoids, and omnivores. The Berger-Parker dominance index showed that the arthropod community among three FWPF habitats had the largest numbers of rare groups and a few dominant groups, a basic FWPF characteristic during the postharvest seasons. Detritivore families Sminthuridae and Entomobryidae (Collembola) were the predominant groups that could potentially affect the community greatly, together with predators, including different spider species and insect natural enemies. The density and biomass of arthropods, as well as dominant groups varied widely among the three FWPF habitats during postharvest periods of investigation. For example, arthropod density and biomass were significantly higher in RF than RVW and RV ($P < 0.05$); the density and biomass of detritivores was significantly higher in RF than in RVW ($P < 0.05$), and that of herbivores was significantly higher in RVW, than in RV and RF. Also, the several community diversity indices of arthropods varied among three FWPF habitats during postharvest periods of investigation. Although the Shannon-Weiner and Pielou diversity indexes were significantly higher in RVW and RV, than RF ($P < 0.05$), the Simpson index was significantly higher in RF, than RVW and RV. The Margalef richness index was significantly greater in RVW than RF ($P < 0.05$). Meanwhile, there was a significantly positive correlation between density and biomass of arthropods, detritivores, and herbivores, and between predators and prey (detritivores and herbivores) in their biomass ($P < 0.05$). The Gower similarity index showed that the composition and structure of arthropod communities among three FWPF habitats were highly similar, but the similarity declined markedly under the effects of environmental factors from the different habitats and methods of tillage and harvesting in the three FWPFs. The farmland habitats had a greater impact on the arthropod community FWPFs, followed by water quantity, rice straw biomass, planting patterns, and harvesting methods. In addition, the results of the principal component analysis (PCA) and cluster analysis suggested that the habitat heterogeneity of FWPFs and their plots for sampling was considerably influenced by different community parameters and environmental factors. On the basis of these results, we can conclude that there is a cascade effect among rice straw, detritivores, and predators, and Collembola species play an important role in the cascade system; and arthropod biomass and diversity are closely related to the environmental factors in FWPFs and their habitats.

Key Words: fallow waterlogged paddy fields; arthropod communities; biomass; cascade effects; postharvest seasons

在我国南方稻区,冬水田是水稻长期栽培过程中形成的一种特殊稻田,既是一种耕作制度,又是一种大规模蓄水工程^[1];特别对于缺乏水利工程及配套灌溉条件的丘陵山区,具有重要的生态作用,其地位和价值更

是随着近年来频发的高温干旱,受到了社会各界的重视^[2]。目前,冬水田广布于四川、重庆等西南丘陵山区^[1,3];仅重庆市面积就达 110 万 hm^2 , 占其水稻栽种面积的 59.0% 以上^[4]。

由于冬水田在休耕期残留有大量的水稻植株秸秆(稻桩),缺乏水稻主要害虫,且植食性昆虫种类和数量均极度偏少,导致稻田中捕食者的主要猎物以稻秆残体为食的腐食类弹尾虫等为主,并形成了与水稻生育期完全不同的生存和觅食策略^[5]。同时,冬水田还田稻秆的难腐解以及由此导致的耕作困难,特别是稻秆中有有机养分如何能被快速分解也是一项重要且现实问题。而以弹尾纲/目(Collembola)为代表的腐食者(分解者)在植株残体撕碎、转化和分解过程中,其种类组成和数量在很大程度上影响农田生态系统的物质循环^[6-7]。此外,在稻田系统节肢动物随着农事活动存在着群落重建的过程^[8],且稻田耕作和管理措施也对节肢动物群落及其功能团重建有不同程度影响^[9-10];而非稻区生境的异质性对稻田节肢动物群落多样性和丰富度等的影响较大^[11-15]。因此,研究冬水田系统中节肢动物群落的多样性和功能特征及其影响因素将对翌年水稻生育期稻田建立积极有效的害虫生物防治体系,以及稻田秸秆中的养分循环等都具有重要的理论参考价值。但目前这方面的研究还很欠缺。尽管有一些越冬期冬闲田节肢动物群落^[16-18]或捕食者蜘蛛^[19-20]和腐食者弹尾虫^[21-22]调查的报道,然而涉及休耕期不同冬水田节肢动物群落功能团多样性及其生物量与水稻秸秆、耕作措施及生境因素等相关性分析的研究还鲜有报道。

在重庆等西南山区,冬水田的种植模式 90% 以上以年种一季中稻或再生稻为主;水稻从 9 月收割后蓄水保田休耕至翌年 5 月移栽的时间长达 6—8 个月^[1,23]。因此,在这些单季稻区休耕季节,冬水田中节肢动物群落多样性特征以及与稻田秸秆、耕作和管理措施等的关系如何,都不得而知。基于此,本研究在前期调查基础上,选择了 3 个有代表性的重庆丘陵山地冬水田,调查了休耕期该系统中节肢动物群落的多样性及生物量特征,分析了稻田秸秆和耕作措施等与这些节肢动物发生的相关性,以期对冬水田在可持续生态农业理论体系的建立等方面提供可参考的理论依据。

1 研究区概况

璧山区($106^{\circ}02'—106^{\circ}20'E$, $29^{\circ}17'—29^{\circ}53'N$)位于重庆市主城以西,处于中亚热带湿润季风气候区,气候温暖湿润,雨量充沛。年均气温 17.9°C , 极端最高温和最低温分别为 41.1°C 和 -3.0°C ; 年均降雨量 1047 mm,日照时数 1296 h,无霜期 337 d。

八塘镇和河边镇属于璧山区的农业大镇,分别位于璧山区的最北部和西北部,农作物的种植以蔬菜、水稻和玉米等为主,正在积极建设现代都市农业示范基地;其冬水田生境类型属于重庆地区典型的丘陵沟壑稻田(沟壑地带种植水稻,周边丘陵坡地为蔬菜、退耕还林地或荒地)。该冬水田稻区的种植模式 90% 以上以年种一季中稻或再生稻为主^[23]。研究表明,环境的异质性能导致稻田节肢动物群落多样性的差异^[11,24],因此,在前期调查基础上本研究选取了上述 2 个镇 3 类冬水田生境(均为免耕稻田)作为调查的代表样点。另外,丘陵沟壑冬水田往往处在一狭长不平坦的沟谷地带,尽管不同田块间可通过加固田埂来保证稻田蓄水量,但不同位置田块的地势高度落差会造成较长不落雨期间蓄水量的变化,如地势高的上游田块蓄水量较少,而地势低的下田块积水较多。同时,各个样点内的不同田块往往属于不同农户,这些田块耕作和管理制度的不同亦会造成田块间的小生境差异。基于此,本研究在每个调查点地势由高到低的上游、中游和下游分别设置了一个田块作为小区,试图进一步深入分析各样点内部小生境条件及耕作和管理制度不同对节肢动物群落多样性特征的影响。在当地政府技术人员指导下,这些稻田在水稻生育期的水肥管理和病虫害的防治措施方面基本相似。3 类生境稻田各田块收割前的水稻品种基本一致,主要为川香优和隆优近似系列,收割期均为 2016 年 8 月下旬。其中样点 1($106^{\circ}19'43'E$, $29^{\circ}50'23'N$)和样点 2($106^{\circ}18'5'E$, $29^{\circ}50'31'N$)分别位于八塘镇的石苗村和三元村;样点 3($106^{\circ}10'22'E$, $29^{\circ}40'7'N$)位于河边镇的浸口村,其基本情况见图 1 和表 1。

2 研究方法

2.1 试验设计及调查方法

试验于 2017 年 2 月上旬至 4 月中旬开展。在参考俞晓平等^[25]和施波等^[26]陷阱法原理基础上,设置陷阱

进行冬水田节肢动物调查(图2)。在稻田中将玻璃瓶(口径9.0 cm,底径11 cm,深24.0 cm,容积约1050 mL)放入事先挖好坑的土壤中,保持陷阱瓶口与土表或水面在一个水平面(图2);然后在杯中倒入少许洗衣粉水液,即制成捕捉土表或水面以上节肢动物的陷阱。3类冬水田生境均设置了各3个面积为0.2 hm²田块作为研究样地;为了进一步深入分析各个样点不同田块间在蓄水量等生境条件以及耕作和管理制度方面的差异可能导致的影响,分别在各样点地势由高到低的上游、中游和下游各设置了一个田块作为小区,每个样点3个,总共9个(表1);每个小区均匀放置3—4个陷阱,陷阱间的距离约为15 m。每3 d 取样1次(如遇雨天顺延),共计18次。

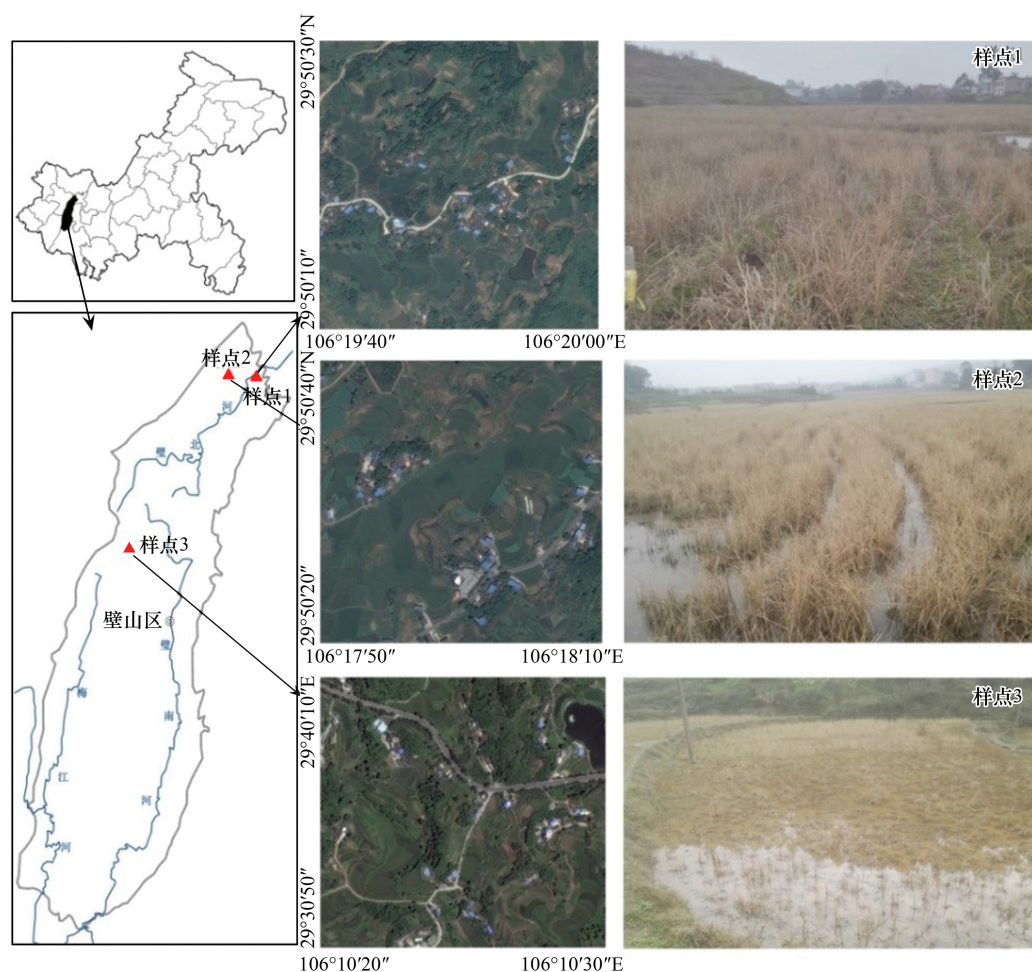


图1 重庆璧山区不同研究样点冬水田分布及生境图

Fig.1 Distribution and habitats of FWPF plots of different sampling sites in investigation area of Bishan County, Chongqing



图2 重庆璧山区冬水田生境陷阱法设置图

Fig.2 Pitfall traps in FWPF plots of Bishan County, Chongqing

表 1 重庆调查稻区基本概况

Table 1 Basic situations of the paddy planting area in Bishan County of Chongqing

样点 Sites	农田生境类型 Farmland habitat types	小区分类 Classification of plots	冬水田信息 The information of fallow waterlogged paddy fields (FWPF)					
			种植模式 Planting patterns	收割方式 Harvesting methods	蓄水量评价 Evaluation of water quantity	稻桩密度 Density of rice stubs/ m ²	稻桩高度 Height of rice stubs/cm	稻桩生物量 Biomass of rice straws/ (g/m ²)
样点 1 First sampling site	水稻、蔬菜和 荒地耕作区	RVW1	M	HM	M	24.98±3.52a	45.23±2.82a	0.29±0.06a
		RVW2	M	HM	AW			
		RVW3	M	HM	MW			
样点 2 Second sampling site	水稻和蔬菜 耕作区	RV1	MR	HH	MW	14.98±5.73ab	35.90±1.54a	0.15±0.02ab
		RV2	MR	HH	MW			
		RV3	M	HM	MW			
样点 3 Third sampling site	水稻和林地 耕作区	RF1	MR	HH	MW	8.23±1.14b	36.3±3.54a	0.13±0.05b
		RF2	MR	HH	MW			
		RF3	MR	HH	MW			

M:一季中稻种植模式,The planting patterns of medium hybrid rice;MR:一季中稻+再生稻种植模式,The planting patterns of medium hybrid rice and ratoon rice;HM:机械化收割,Harvested by machine;HH:人工收割,Harvested by hand;M:稻田水少但土壤湿润,The soil is reasonably moist in paddy plots;AW:稻田有水但未完全淹没地表,There is a small amount of water in paddy plots;MW:稻田蓄水量多且完全淹没土表,There is much water in paddy plots; 同一列中具不同字母者表示差异显著($P<0.05$)

由于受降雨的影响或人为/动物的破坏,各个样点放置的有效回收陷阱(玻璃瓶)总共 524 个,其中,样点 1 为 245 个,样点 2 和样点 3 分别为 161 个和 118 个。每次调查时用同样规格的玻璃瓶将原陷阱中的玻璃瓶替换,然后将替换下来的玻璃瓶连同采集到的节肢动物水溶液一起带回实验室。在实验室将其中的节肢动物挑出并保存在 75%酒精中进行鉴定和统计数量。蜘蛛鉴定到种,其他昆虫类群受分类限制均鉴定到科。

2.2 生物量测定

冬水田水稻秸秆生物量:在 3 个样点的每个调查小区选取代表性的样方(4 m×4 m),将样方内的水稻植株残体齐地面刈割,除去粘附的土壤和砾石等杂质后放置在室内干燥环境下阴干,然后称重。此外,在 3 个样点每个小区选取的代表性样方秸秆刈割前,分别测量样方内稻桩的数量和秸秆高度。

稻田节肢动物生物量:将鉴定和统计数量后的所有节肢动物放置在 65℃烘箱(型号 DGG-9140A,上海齐欣科学仪器有限公司)中干燥,大型节肢动物烘干时间 12 h,中小型为 6 h;然后将所有节肢动物称重。对于大型节肢动物直接称重记录其生物量(g);但受电子天平(型号 FA2004,上海舜宇恒科学仪器有限公司)精度限制(d 值 0.1 mg,e 值 0.1 mg)不能直接称重的中小型种类或类群,先通过该类群单位数量的生物量推算出单头个体生物量,然后根据该类群样本个体数计算总的生物量^[27]。

2.3 数据处理与分析

根据 Berger-Parker 的优势度指数^[28]的计算结果对物种的优势等级进行划分;将其划分为 5 个等级; $D\geq 0.1$ 时为优势种;当 $0.05\leq D<0.1$ 时为丰盛种;当 $0.01\leq D<0.05$ 时为常见种;当 $0.001\leq D<0.01$ 时为偶见种,当 $D<0.001$ 时为稀少或罕见种;其计算公式为:

$$D = N_{\max} / N$$

式中, $N_{\max}$ 为某类群的个体数; N 为群落全部类群的个体数。

冬水稻田节肢动物群落内多样性指数主要采用 Simpson 优势集中性指数、Shannon—Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Margalef 丰富度指数来进行计算;计算公式分别如下:

Simpson 优势集中性指数(C):

$$C = \sum_{i=1}^n (N_i / N)^2$$

Shannon-Wiener 多样性指数(H'):

$$H' = - \sum_{i=1}^n P_i \ln P_i$$

Pielou 均匀度指数(J):

$$E = H' / \ln S$$

Margalef 丰富度指数(D):

$$D = (S-1) / \ln N$$

式中, N_i 为第 i 类群的个体数; N 为群落中所有类群的个体数; $P_i = N_i / N$, S 为类群数。

冬水稻田节肢动物群落组成比较分析主要采用 Gower 相似性系数来进行计算; 该系数主要反映两类生境稻田节肢动物类群上的相似程度; 其计算公式为:

Gower 系数(G_{jk}):

$$G_{jk} = 1/n \sum_{i=1}^n [1 - (|X_{ij} - X_{ik}|) / R_i]$$

式中, 其中 X_{ij} 和 X_{ik} 分别为群落 j 和群落 k 中类群 i 的个体数, R_i 是所有比较群落中第 i 个类群最大值和最小值的差; n 为所有比较群落的总类群数。 G_{jk} 最大值为 1, 最小值为 0。 G_{jk} 值越低, 其相似程度越高。

节肢动物群落及其各功能团密度和生物量数据均为采集的节肢动物个体数换算成的平均密度(个/ m^2)和平均重量(g/ m^2)。数据分析前, 对节肢动物密度数据进行 $\lg(x+1)$ 对数转换; 对节肢动物生物量进行 $\sqrt{x}$ 平方根转换。对服从正态分布和方差齐性的节肢动物群落参数进行单因素方差分析(One-way ANOVA)。而对于不服从正态分布的数据, 采用非参数检验中 Kruskal Wallis 单因素 ANOVA 秩和检验(H)进行总体分析, 若有统计学意义($P < 0.05$), 进一步用该方法中的两两成对比较法分析。在环境因素、节肢动物及其各功能团特征参数符合正态分布基础上, 相关性分析采用 Pearson 法两两比较分析; 若不符合正态分布, 则采用 Spearman 法两两比较分析。在对节肢动物密度和生物量、捕食者与猎物在密度和生物量上的相关性分析基础上, 建立了回归方程并拟合了方程曲线。

应用 SPSS 软件中的聚类分析程序对 3 个样点 9 个小区在节肢动物群落相似性方面进行了系统聚类法分组比较。该聚类法在方法上采用平方 Euclidean 距离法测量, 每两样本间用组间连接法连结。

主成分分析(Principal component analysis, PCA): 应用 CANOCO 软件在对不同冬水稻田环境因子及节肢动物群落参数分析的基础上, 根据这些影响因素的 PCA 得分对不同冬水田样点进行排序分析。

采集地生境图的获得: 在 ArcGIS 软件系统中, 先将样点坐标经过 Albers 投影添加到地形图中, 同时结合 Google Map 遥感数据和现场照片相结合进行制图。

以上分析和作图采用 Microsoft Excel 2007、SPSS 24.0、CANOCO 5 以及 ArcGIS 9.2 软件完成。

3 结果与分析

3.1 冬水田节肢动物群落组成及优势类群(种)

通过调查共捕获冬水田节肢动物 108367 只, 隶属于 3 纲 119 科(种)。通过单位面积(m^2)转换, 这些节肢动物在 3 类冬水田的密度和生物量统计结果见表 2。由表 2 可知, 冬水田节肢动物群落按功能团可分为捕食者、腐食者、植食者、寄生者和杂食者。由密度计算的相对多度结果比较, 3 个样点的均值为腐食者 > 捕食者 > 植食者 > 杂食者 > 寄生者, 腐食者相对多度超过了 97%, 是占绝对主导位置的功能群; 腐食者的相对多度以 RF(样点 3)的 99.72% 为最高, 其后依次是 RV(样点 2)和 RVW(样点 1)的 98.41% 和 93.17%; 捕食者和植食者的相对多度均为 RVW 最高, 分别为 3.21% 和 3.22%, 其后依次为 RV 和 RF, 分别为 0.93% 和 0.59%, 0.17% 和 0.07%; 寄生者和杂食者的在 3 个样点均较小, 为 0.01%—0.28%。由生物量计算的各功能团生物量占节肢动物群落生物量的百分比结果比较, 3 个样点的均值为捕食者 > 腐食者 > 植食者 > 寄生者 > 杂食者; 捕食者和腐食者的相对生物量分别为 46.64% 和 39.64%, 平均总和达到了 86.29%, 均为主要功能群; 捕食者以 RF 的 53.67% 为最高, 其后依次是 RV 和 RVW 的 52.09% 和 34.16%; 腐食者以 RF 的 59.92% 为最高, 然后依次为 RV

表 2 重庆休耕期冬水田节肢动物群落组成和结构、密度及生物量

Table 2 Taxonomic composition, community structure, density and biomass of arthropods in fallow waterlogged paddy fields of Chongqing																	
序号 Sequence number	类群或种类 Groups and species	样点 1/Site 1 (RVW)			样点 2/Site 2 (RV)			样点 3/Site 3 (RF)			平均值/Mean						
		/(个/m ²)	/(g/m ²)	/(%)	/(个/m ²)	/(g/m ²)	/(%)	/(个/m ²)	/(g/m ²)	/(%)	/(个/m ²)	/(g/m ²)	/(%)				
功能团 Functional groups:捕食者 Predator																	
蛛形纲 Arachnida																	
圆蛛科 Araneidae																	
1	角园蛛 <i>Araneus cornutus</i>	2812.5	0.16	3.81	0.75	781.3	0.03	0.83	0.34	625.0	0.01	0.40	0.11	1406.3	0.06	1.68	0.40
2	悦目金蛛 <i>Argiope amoena</i>	468.8	0.03	0.48	0.10	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	156.3	0.01	0.16	0.03
3	横纹金蛛 <i>Argiope bruennichi</i>	1093.8	0.06	1.48	0.29	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	364.6	0.02	0.49	0.10
4	黄金肥蛛 <i>Larinia argiopiformis</i>	156.3	0.01	0.16	0.03	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	52.1	0.00	0.05	0.01
5	黄褐新园蛛 <i>Neoscona doeritzi</i>	0.0	0.00	0.00	0.00	156.3	0.01	0.14	0.06	0.0	0.00	0.00	0.00	52.1	0.00	0.05	0.02
6	嗜水新园蛛 <i>Neoscona navica</i>	156.3	0.01	0.03	0.01	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	52.1	0.00	0.01	0.00
7	棒络新妇 <i>Nephila clavata</i>	312.5	0.02	0.34	0.07	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	104.2	0.01	0.11	0.02
8	四点亮腹蛛 <i>Singa pygmaea</i>	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	156.3	0.00	0.14	0.04	52.1	0.00	0.05	0.01
管巢蛛科 Clubionidae																	
9	棕管巢蛛 <i>Clubiona japonicola</i>	0.0	0.00	0.00	0.00	156.3	0.01	0.17	0.07	312.5	0.00	0.18	0.05	156.3	0.00	0.12	0.04
10	四斑锯螯蛛 <i>Dyschiragnatha quabrinaculata</i>	156.3	0.01	4.59	0.91	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	52.1	0.00	1.53	0.30
皿蛛科 Linyphiidae																	
11	隆背微蛛 <i>Erigone prominens</i>	2187.5	0.12	0.18	0.04	1718.8	0.06	0.17	0.07	625.0	0.01	0.16	0.04	1510.4	0.06	0.17	0.05
12	齿螯额角蛛 <i>Gnathonarium dentatum</i>	156.3	0.01	0.01	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	52.1	0.00	0.00	0.00
13	驼背额角蛛 <i>Gnathonarium gibberum</i>	468.8	0.03	0.06	0.01	156.3	0.01	0.06	0.02	0.0	0.00	0.00	0.00	208.3	0.01	0.04	0.01
14	草间小黑蛛 <i>Hylyphantes graminicola</i>	2187.5	0.12	0.12	0.02	625.0	0.02	0.03	0.01	625.0	0.01	0.04	0.01	1145.8	0.05	0.06	0.01
15	黑侏儒蛛 <i>Meioneta nigra</i>	156.3	0.01	0.01	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	52.1	0.00	0.00	0.00
16	食虫沟瘤蛛 <i>Ummeliata insecticeps</i>	3281.3	0.18	1.04	0.21	312.5	0.01	0.13	0.05	156.3	0.00	0.01	0.00	1250.0	0.07	0.39	0.09
17	东京沟瘤蛛 <i>Ummeliata tokyoensis</i>	625.0	0.03	0.03	0.01	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	208.3	0.01	0.01	0.00
狼蛛科 Lycosidae																	
18	星豹蛛 <i>Pardosa astrigera</i>	1250.0	0.07	9.68	1.91	937.5	0.03	7.80	3.20	937.5	0.01	11.04	2.89	1041.7	0.04	9.50	2.67
19	沟渠豹蛛 <i>Pardosa laura</i>	4375.0	0.24	60.61	11.96	1406.3	0.05	12.39	5.09	312.5	0.00	1.48	0.39	2031.3	0.10	24.83	5.81
20	拟环纹豹蛛 <i>Pardosa pseudoannulata</i>	781.3	0.04	10.25	2.02	312.5	0.01	3.81	1.56	156.3	0.00	1.44	0.38	416.7	0.02	5.17	1.32
21	丁纹豹蛛 <i>Pardosa tinsignita</i>	2343.8	0.13	18.36	3.62	625.0	0.02	9.06	3.72	156.3	0.00	1.89	0.49	1041.7	0.05	9.77	2.61
22	真水狼蛛 <i>Pirata piraticus</i>	1875.0	0.10	23.48	4.64	781.3	0.03	8.03	3.30	2031.3	0.02	16.39	4.29	1562.5	0.05	15.97	4.07
23	类水狼蛛 <i>Pirata piratoides</i>	4531.3	0.25	34.75	6.86	4062.5	0.15	31.89	13.09	3593.8	0.03	26.55	6.95	4062.5	0.14	31.06	8.96
24	拟水狼蛛 <i>Pirata subpiraticus</i>	4531.3	0.25	50.13	9.89	3437.5	0.12	41.98	17.23	2812.5	0.02	35.61	9.32	3593.8	0.13	42.57	12.15
25	奇异雅蛛 <i>Trochosa rutilata</i>	937.5	0.05	12.84	2.53	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	312.5	0.02	4.28	0.84

续表

序号 Sequence number	类群或种类 Groups and species	样点 1/Site 1 (RVW)			样点 2/Site 2 (RV)			样点 3/Site 3 (RF)			平均值/Mean						
		/(个/m²)	/%	/(g/m²)	/(个/m²)	/%	/(g/m²)	/(个/m²)	/%	/(g/m²)	/(个/m²)	/%	/(g/m²)	/%			
球腹蛛科 Theridiidae																	
26	四突瘤腹蛛 <i>Chrosiothes sudabides</i>	156.3	0.01	0.16	0.03	0.0	0.00	0.00	0.00	156.3	0.00	0.01	0.00	104.2	0.00	0.06	0.01
27	八斑鞘腹蛛 <i>Coleosoma octomaculatum</i>	156.3	0.01	0.01	0.00	156.3	0.01	0.01	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	104.2	0.00	0.01	0.00
蟹蛛科 Thomisidae																	
28	三突花蛛 <i>Misumenops tricuspidatus</i>	1406.3	0.08	0.64	0.13	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	468.8	0.03	0.21	0.04
29	条纹蝇虎 <i>Plexippus setipet</i>	156.3	0.01	0.84	0.17	156.3	0.01	0.15	0.06	0.0	0.00	0.00	0.00	104.2	0.00	0.33	0.08
30	斜纹花蟹蛛 <i>Xysticus saganus</i>	156.3	0.01	0.02	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	52.1	0.00	0.01	0.00
肖蛸科 Tetragnathidae																	
31	鳞纹肖蛸 <i>Tetragnatha squamata</i>	312.5	0.02	4.59	0.91	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	104.2	0.01	1.53	0.30
跳蛛科 Salticidae																	
32	微菱头蛛 <i>Bianor aenescens</i>	156.3	0.01	2.34	0.46	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	52.1	0.00	0.78	0.15
33	纵条蝇狮 <i>Marpissa magister</i>	156.3	0.01	0.25	0.05	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	52.1	0.00	0.08	0.02
昆虫纲 Insecta																	
鞘翅目 Coleoptera																	
34	步甲科 Carabidae	468.8	0.03	0.42	0.08	0.0	0.00	0.00	0.00	156.3	0.00	0.12	0.03	208.3	0.01	0.18	0.04
35	瓢甲科 Coccinellidae	312.5	0.02	0.69	0.14	0.0	0.00	0.00	0.00	156.3	0.00	0.12	0.03	156.3	0.01	0.27	0.06
36	鼓甲科 Gyrinidae	0.0	0.00	0.00	0.00	156.3	0.01	0.02	0.01	0.0	0.00	0.00	0.00	52.1	0.00	0.01	0.00
37	隐翅甲科 Staphylinidae	7656.3	0.43	8.45	1.67	3125.0	0.11	3.72	1.53	1875.0	0.02	2.00	0.52	4218.8	0.19	4.72	1.24
双翅目 Diptera																	
38	食虫虻科 Asilidae	937.5	0.05	0.54	0.11	312.5	0.01	0.28	0.12	312.5	0.00	0.44	0.11	520.8	0.02	0.42	0.11
39	长足虻科 Dolichopodidae	625.0	0.03	0.39	0.08	1875.0	0.07	1.04	0.43	156.3	0.00	0.09	0.02	885.4	0.03	0.50	0.18
40	沼蝇科 Scomyzidae	1875.0	0.10	7.88	1.55	625.0	0.02	2.63	1.08	1250.0	0.01	5.06	1.32	1250.0	0.05	5.19	1.32
41	食蚜蝇科 Syrphidae	156.3	0.01	0.07	0.01	156.3	0.01	0.07	0.03	0.0	0.00	0.00	0.00	104.2	0.00	0.05	0.01
42	虻科 Tabanidae	3593.8	0.20	3.74	0.74	2812.5	0.10	1.63	0.67	1093.8	0.01	0.62	0.16	2500.0	0.10	2.00	0.52
43	剑虻科 Therevidae	312.5	0.02	0.23	0.05	312.5	0.01	0.18	0.07	0.0	0.00	0.00	0.00	208.3	0.01	0.14	0.04
半翅目 Hemiptera																	
44	田鳖科 Belostomatidae	156.3	0.01	1.45	0.29	0.0	0.00	0.00	0.00	156.3	0.00	11.38	2.98	104.2	0.00	4.28	1.09
45	划蝽科 Corixidae	3437.5	0.19	3.33	0.66	781.3	0.03	0.60	0.25	1250.0	0.01	0.94	0.25	1822.9	0.08	1.62	0.38
46	水龟科 Gerridae	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	156.3	0.00	0.03	0.01	52.1	0.00	0.01	0.00
47	猎蝽科 Reduviidae	312.5	0.02	2.28	0.45	0.0	0.00	0.00	0.00	1562.5	0.01	12.02	3.14	625.0	0.01	4.77	1.20
48	宽尾蝽科 Velidae	0.0	0.00	0.00	0.00	156.3	0.01	0.08	0.03	0.0	0.00	0.00	0.00	52.1	0.00	0.03	0.01
汇总		57500.0	3.21	271.94	53.67	26093.8	0.93	126.91	52.09	21093.8	0.17	130.54	34.16	34895.8	1.44	176.46	46.64

续表

序号 Sequence number	类群或种类 Groups and species	样点 1/Site 1 (RVW)			样点 2/Site 2 (RV)			样点 3/Site 3 (RF)			平均值/Mean						
		/(个/m²)	/(g/m²)	/(%)	/(个/m²)	/(g/m²)	/(%)	/(个/m²)	/(g/m²)	/(%)	/(个/m²)	/(g/m²)	/(%)				
功能团 Functional groups: 腐食者 Detritivore																	
弹尾纲 Collembola																	
49	长角蚋科 Entomobryidae	626406.3	35.01	34.89	6.89	865781.3	31.02	50.86	20.88	526562.5	4.27	28.24	7.39	672916.7	23.43	38.00	11.72
50	球角蚋科 Hypogastruridae	468.8	0.03	0.01	0.00	312.5	0.01	0.02	0.01	781.3	0.01	0.02	0.00	520.8	0.01	0.01	0.00
51	等节蚋科 Isotomidae	468.8	0.03	0.03	0.01	1562.5	0.06	0.13	0.05	0.0	0.00	0.00	0.00	677.1	0.03	0.05	0.02
52	圆蚋科 Sminthuridae	749062.5	41.87	11.60	2.29	1702188.0	60.98	24.77	10.17	11597344.0	93.97	167.01	43.70	4682865.0	65.61	67.79	18.72
昆虫纲 Insecta																	
鞘翅目 Coleoptera																	
53	坚甲科 Colydiidae	2343.8	0.13	7.81	1.54	2031.3	0.07	1.77	0.73	937.5	0.01	1.61	0.42	1770.8	0.07	3.73	0.90
54	皮蠹科 Dermestidae	156.3	0.01	0.14	0.03	0.0	0.00	0.00	0.00	312.5	0.00	2.89	0.76	156.3	0.00	1.01	0.26
55	牙甲科 Hydrophilidae	156.3	0.01	1.47	0.29	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	52.1	0.00	0.49	0.10
56	筒蠹科 Lyemexylidae	468.8	0.03	5.13	1.01	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	156.3	0.01	1.71	0.34
57	蚊甲科 Pselaphidae	312.5	0.02	0.12	0.02	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	104.2	0.01	0.04	0.01
58	埋葬甲科 Silphidae	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	312.5	0.00	2.63	0.69	104.2	0.00	0.88	0.23
59	拟步甲科 Tenebrionidae	312.5	0.02	0.31	0.06	0.0	0.00	0.00	0.00	156.3	0.00	0.20	0.05	156.3	0.01	0.17	0.04
双翅目 Diptera																	
60	花蝇科 Anthomyiidae	2343.8	0.13	1.35	0.27	468.8	0.02	0.33	0.14	781.3	0.01	0.50	0.13	1197.9	0.05	0.73	0.18
61	毛蚊科 Bibionidae	937.5	0.05	0.51	0.10	0.0	0.00	0.00	0.00	156.3	0.00	0.08	0.02	364.6	0.02	0.20	0.04
62	网蚊科 Blepharoceridae	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	312.5	0.00	0.03	0.01	104.2	0.00	0.01	0.00
63	蚊科 Culicidae	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	312.5	0.00	0.01	0.00	104.2	0.00	0.00	0.00
64	细蚊科 Dixidae	22500.0	1.26	0.67	0.13	16406.3	0.59	0.67	0.27	4218.8	0.03	0.18	0.05	14375.0	0.63	0.50	0.15
65	蕈蚊科 Mycetophilidae	129375.0	7.23	10.71	2.11	28281.3	1.01	2.40	0.99	40156.3	0.33	3.29	0.86	65937.5	2.86	5.47	1.32
66	瘦蚊科 Mycetophilidae	7187.5	0.40	0.84	0.16	7812.5	0.28	0.69	0.28	2187.5	0.02	0.17	0.04	5729.2	0.23	0.56	0.16
67	蛾蚋科 Psychodidae	34218.8	1.91	3.68	0.73	37343.8	1.34	2.17	0.89	11562.5	0.09	0.62	0.16	27708.3	1.11	2.16	0.59
68	蚋科 Simuliidae	40937.5	2.29	1.91	0.38	42343.8	1.52	1.74	0.72	89531.3	0.73	4.52	1.18	57604.2	1.51	2.73	0.76
69	大蚊科 Tipulidae	21250.0	1.19	16.15	3.19	10312.5	0.37	5.09	2.09	19218.8	0.16	16.50	4.32	16927.1	0.57	12.58	3.20
70	寡脉蝇科 Asteiidae	937.5	0.05	0.60	0.12	4062.5	0.15	2.32	0.95	0.0	0.00	0.00	0.00	1666.7	0.07	0.97	0.36
71	丽蝇科 Calliphoridae	312.5	0.02	0.19	0.04	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	104.2	0.01	0.06	0.01
72	蠅科 Ceratopogonidae	312.5	0.02	0.20	0.04	156.3	0.01	0.09	0.04	0.0	0.00	0.00	0.00	156.3	0.01	0.10	0.03
73	摇蚊科 Chironomidae	20937.5	1.17	0.45	0.09	21562.5	0.77	0.45	0.18	4218.8	0.03	0.09	0.02	15572.9	0.66	0.33	0.10
74	跗大蚊科 Cylindrotomidae	625.0	0.03	0.18	0.04	156.3	0.01	0.09	0.04	0.0	0.00	0.00	0.00	260.4	0.01	0.09	0.02
75	沼大蚊科 Limoniidae	0.0	0.00	0.00	0.00	468.8	0.02	0.02	0.01	0.0	0.00	0.00	0.00	156.3	0.01	0.01	0.00

续表

序号 Sequence number	类群或种类 Groups and species	样点 1/Site 1 (RVW)			样点 2/Site 2 (RV)			样点 3/Site 3 (RF)			平均值/Mean		
		/(个/m ²)	/%	/(g/m ²)	/(个/m ²)	/%	/(g/m ²)	/(个/m ²)	/%	/(g/m ²)	/(个/m ²)	/%	/(g/m ²)
76	尖翅蝇科 Lonchopteridae	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	312.5	0.01	0.09	0.04	0.0	0.00	104.2
77	蝇科 Muscidae	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	156.3	0.01	0.09	0.04	468.8	0.00	208.3
78	菌蚊科 Mycetophilidae	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	312.5	0.01	0.01	0.00	0.0	0.00	104.2
79	粗脉毛蚊科 Pachyneuridae	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	156.3	0.01	0.17	0.07	0.0	0.00	52.1
80	蚤蝇科 Phoridae	781.3	0.04	0.63	0.12	0.00	156.3	0.01	0.01	0.00	156.3	0.00	364.6
81	毛蠅科 Psychodidae	1406.3	0.08	0.90	0.18	0.06	1718.8	0.06	0.86	0.35	0.0	0.00	1041.7
82	粪蚊科 Scatopsidae	937.5	0.05	0.27	0.05	0.01	156.3	0.01	0.02	0.01	0.0	0.00	364.6
83	水虻科 Stratiomyidae	468.8	0.03	0.14	0.03	0.02	468.8	0.02	0.28	0.11	0.0	0.00	312.5
84	蜉蝣目 Ephemeroptera												
	蜉蝣科 Ephemeridae	1093.8	0.06	0.03	0.01	0.04	1250.0	0.04	0.04	0.02	6875.0	0.06	3072.9
汇总		16667190	93.17	10092	1993	27459380	98.41	95.18	39.08	12306563.0	99.72	229.04	55730740
功能团 Functional groups: 植食者 Herbivore													
鞘翅目 Coleoptera													
85	吉丁甲科 Buprestidae	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	156.3	0.01	0.09	0.04	0.0	0.00	52.1
86	叶甲科 Chrysomelidae	6718.8	0.38	81.78	16.14	0.03	781.3	0.03	7.51	3.08	1406.3	0.01	2968.8
87	象甲科 Curculionidae	312.5	0.02	0.23	0.05	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	156.3	0.00	156.3
88	叩甲科 Elateridae	156.3	0.01	0.17	0.03	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	52.1
89	金龟科 Scarabaeidae	781.3	0.04	3.19	0.63	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	260.4
双翅目 Diptera													
90	潜蝇科 Agromyzidae	937.5	0.05	0.54	0.11	0.02	468.8	0.02	0.25	0.10	1250.0	0.01	885.4
91	秆蝇科 Chloropidae	12968.8	0.72	11.44	2.26	0.18	5156.3	0.18	3.18	1.31	1718.8	0.01	6614.6
92	水蝇科 Ephydriidae	11718.8	0.66	5.45	1.08	0.08	2187.5	0.08	1.26	0.52	1562.5	0.01	5156.3
93	实蝇科 Tephritidae	2031.3	0.11	1.18	0.23	0.06	1718.8	0.06	1.09	0.45	156.3	0.00	1302.1
半翅目 Hemiptera													
94	蚜科 Aphididae	9218.8	0.52	0.37	0.07	0.01	312.5	0.01	0.01	0.01	156.3	0.00	3229.2
95	叶蝉科 Cicadellidae	6875.0	0.38	2.63	0.52	0.08	2187.5	0.08	0.34	0.14	2968.8	0.02	4010.4
96	缘蝽科 Coreidae	156.3	0.01	0.10	0.02	0.01	312.5	0.01	0.81	0.33	156.3	0.00	208.3
97	飞虱科 Delphacidae	0.0	0.00	0.00	0.00	0.01	156.3	0.01	0.02	0.01	156.3	0.00	104.2
98	蜡蝉科 Fulgoridae	0.0	0.00	0.00	0.00	0.01	156.3	0.01	0.12	0.05	0.00	0.00	52.1
99	长蝽科 Lygaeidae	0.0	0.00	0.00	0.00	0.01	156.3	0.01	0.97	0.40	0.00	0.00	52.1
100	角蝉科 Membracidae	937.5	0.05	0.62	0.12	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	312.5
101	盲蝽科 Miridae	1562.5	0.09	0.77	0.15	0.02	468.8	0.02	0.33	0.13	1093.8	0.01	1041.7

续表

序号 Sequence number	类群或种类 Groups and species	样点 1/Site 1 (RVW)			样点 2/Site 2 (RV)			样点 3/Site 3 (RF)			平均值/Mean		
		/(个/m ²)	/%	/(g/m ²)	/(个/m ²)	/%	/(g/m ²)	/(个/m ²)	/%	/(g/m ²)	/(个/m ²)	/%	/(g/m ²)
102	木虱科 Psyllidae	1093.8	0.06	0.08	0.02	312.5	0.01	0.08	0.03	312.5	0.00	0.02	0.01
	鳞翅目 Lepidoptera												
103	细蛾科 Gracilariidae	0.0	0.00	0.00	0.00	625.0	0.02	1.30	0.53	312.5	0.00	10.68	2.79
104	弄蝶科 Hesperidae	0.0	0.00	0.00	0.00	312.5	0.01	2.06	0.85	0.0	0.00	0.00	0.00
105	夜蛾科 Noctuidae	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	468.8	0.00	1.92	0.50
	直翅目 Orthoptera												
106	蟋蟀科 Gryllidae	468.8	0.03	4.02	0.79	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00
107	蝼蛄科 Gryllotalpidae	156.3	0.01	1.52	0.30	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00
108	菱蝗科 Tetrigidae	1406.3	0.08	16.35	3.23	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00
	缨翅目 Thysanoptera												
109	蓟马科 Thripidae	0.0	0.00	0.00	0.00	468.8	0.02	0.01	0.00	468.8	0.00	0.01	0.00
	汇总	57500.6	3.22	130.44	25.75	15938.0	0.59	19.43	7.98	12344.3	0.07	21.63	5.65
	功能团 Functional groups: 寄生者 Parasite												
	双翅目 Diptera												
110	寄蝇科 Tachinidae	156.3	0.01	0.11	0.02	781.3	0.03	0.23	0.09	0.0	0.00	0.00	0.00
	膜翅目 Hymenoptera												
111	茧蜂科 Braconidae	937.5	0.05	0.78	0.15	937.5	0.03	0.62	0.26	156.3	0.00	0.12	0.03
112	小蜂科 Chalcididae	468.8	0.03	0.36	0.07	0.0	0.00	0.00	0.00	312.5	0.00	0.25	0.06
113	瘦蜂科 Cynipidae	156.3	0.01	0.12	0.02	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00
114	环腹瘦蜂科 Figitidae	156.3	0.01	0.13	0.03	156.3	0.01	0.11	0.05	156.3	0.00	0.13	0.03
115	姬蜂科 Ichneumonidae	312.5	0.02	0.23	0.04	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00
116	窄腹细蜂科 Ropronidae	156.3	0.01	0.13	0.03	0.0	0.00	0.00	0.00	156.3	0.00	0.11	0.03
	汇总	2343.8	0.13	1.86	0.37	1875.0	0.07	0.96	0.40	781.3	0.01	0.60	0.16
	功能团 Functional groups: 杂食者 Omnivore												
	鞘翅目 Coleoptera												
117	出尾甲科 Nitidulidae	781.3	0.04	1.42	0.28	1093.8	0.04	0.96	0.40	312.5	0.00	0.26	0.07
	膜翅目 Hymenoptera												
118	蚁科 Formicidae	0.0	0.00	0.00	0.00	156.3	0.01	0.16	0.06	156.3	0.00	0.16	0.04
	缨尾目 Thysanura												
119	衣鱼科 Lepismatidae	4218.8	0.24	0.14	0.03	312.5	0.01	0.01	0.00	312.5	0.00	0.01	0.00
	汇总	5000.0	0.28	1.55	0.31	1562.5	0.06	1.13	0.46	781.3	0.01	0.42	0.11
	3 个样地汇总	1789062.5	100.00	506.67	100.00	2791406.3	100.0	243.62	100.00	12341562.5	100.00	382.20	100.00
	总类群数(科和种类)												
	Berger-Parker 优势度指数(D)												
	Berger-Parker 的优势度指数(D), 排序依次为: 优势类群(种)、丰盛类群(种)、偶见类群(种)和罕见或稀少类群(种)												
		3, 0, 6, 31, 57	97		2, 0, 4, 13, 32	75		1, 0, 1, 4, 63	69		119		

和 RVW 的 39.08% 和 19.93%; 植食者以 RVW 的 25.75% 为最高, 其次分别为 RV 和 RF 的 7.98% 和 5.65%; 寄生者和杂食者在 3 个样点均较小, 为 0.11%—0.46%。3 类冬水田节肢动物类群(种)数以 RVW 的 97 个为最高, 而 RV 和 RF 的接近, 分别为 75 个和 69 个。

Berger—Parker 优势度指数结果指出, 冬水田节肢动物群落中的罕见或稀少种(类群)数量最多, 其后依次是偶见种(类群)、常见种(类群)和优势种(类群); 优势类群仅有腐食功能团中的圆蟪科和长角蟪科, 其优势度指数分别为 3.92 和 0.12。其中, 圆蟪科由密度计算的相对多度在 3 个样点的值为 41%—94%, 均值为 65.61%, 而由生物量计算的占节肢动物总生物量的百分比为 2%—44%, 均值为 18.72%; 长角蟪科由密度计算的相对多度在 3 个样点的值为 4%—36%, 均值为 23.43%, 而由生物量计算的百分比为 6%—21%, 均值为 11.72%。常见种(类群)主要有腐食者中的摇蚊科、细蚊科、蛾蚋科、蚋科和大蚊科。偶见种(类群)主要有捕食者中的角园蛛、隆背微蛛、草间小黑蛛、食虫沟瘤蛛、沟渠豹蛛、丁纹豹蛛、拟水狼蛛、真水狼蛛、类水狼蛛、隐翅甲科、沼蝇科、虻科和划蝽科, 腐食者中的坚甲科和瘦蚊科, 植食者中的叶甲科、秆蝇科、水蝇科、实蝇科、叶蝉科和蚜科, 以及杂食者中的衣鱼科。罕见或稀少种(类群)在捕食者中主要有蛛形纲中的 31 种和昆虫纲中的 12 科; 腐食者中主要有弹尾纲中的 2 科和昆虫纲中的 20 科; 植食者、寄生者和杂食者均属于昆虫纲, 分别为 24 科、7 科和 2 科。丰盛类群在 3 个生境均无(表 2)。

3.2 节肢动物群落密度和生物量

3.2.1 密度

冬水田 3 个样点的节肢动物平均密度为 $RF > RV > RVW$, RF 显著大于 RV 和 RVW ($P < 0.05$), RVW 和 RV 差异不显著 ($P > 0.05$); 其中 RVW 中的 $RVW1$ 和 $RVW3$ 显著差异 ($P < 0.05$), RV 中的 $RV1$ 分别与 $RV2$ 和 $RV3$ 差异显著 ($P < 0.05$), RF 中的 $RF1$ 和 $RF3$ 均远大于 $RF2$, 且差异显著 ($P < 0.05$) (图 3)。腐食者在 3 个样点间的平均密度为 RF 显著大于 RVW 和 RV ($P < 0.05$); RV 中的 $RV2$ 和 $RV3$ 显著大于 $RV1$ ($P < 0.05$); RF 中的 $RF3$ 显著大于 $RF2$ ($P < 0.05$); 其他样点及其小区间的差异均不显著 ($P > 0.05$)。捕食者在 3 个样点间的平均密度均差异不显著 ($P > 0.05$); $RVW1$ 显著大于 $RVW3$ ($P < 0.05$), 其他样点各小区间均差异不显著 ($P > 0.05$)。植食者中的 RVW 显著大于 RV 和 RF ($P < 0.05$); 其他样点及其各小区间的差异均不显著 ($P > 0.05$) (图 3)。

3.2.2 生物量

节肢动物在 3 个样点的平均生物量为 RF 显著大于 RVW 和 RV ($P < 0.05$), RVW 和 RV 差异不显著 ($P > 0.05$); 3 个样点各小区间差异均不显著 ($P > 0.05$) (图 4)。腐食者在 RF 和 RV 的平均生物量显著大于 RVW ($P < 0.05$); RV 中的 3 个小区间均差异显著 ($P < 0.05$); RF 中的 $RF3$ 显著大于 $RF1$ 和 $RF2$ ($P < 0.05$); 其他样点及其小区间的差异均不显著 ($P > 0.05$)。捕食者在 3 个样点间的平均生物量均差异不显著 ($P > 0.05$); RVW 中的 $RVW1$ 和 $RVW2$ 显著大于 $RVW3$ ($P < 0.05$); 其他样点各小区间差异均不显著 ($P > 0.05$)。植食者在 RVW 的平均生物量显著大于 RV 和 RF ($P < 0.05$); 其他样点及其小区间的差异均不显著 ($P > 0.05$) (图 4)。

3.3 节肢动物群落多样性特征

Shannon-Wiener 多样性指数在 3 个样点间, RVW 和 RV 显著大于 RF ($P < 0.05$), RVW 和 RV 间差异不显著 ($P > 0.05$); 其中, RVW 中的 $RVW1$ 和 $RVW2$ 显著大于 $RVW3$ ($P < 0.05$), RV 中的 $RV1$ 显著大于 $RV2$ 和 $RV3$ ($P < 0.05$), RF 中的 $RF2$ 显著大于 $RF1$ 和 $RF3$ ($P < 0.05$), 其他样点各小区间差异均不显著 ($P > 0.05$)。对于 Margalef 丰富度指数, RVW 显著大于 RF ($P < 0.05$), 其他样点间差异不显著 ($P > 0.05$); 其中, RVW 中的 $RVW1$ 和 $RVW2$ 显著大于 $RVW3$ ($P < 0.05$), 其他样点各小区间差异均不显著 ($P > 0.05$)。对于 Pielou 均匀度指数, RVW 和 RV 显著大于 RF ($P < 0.05$), RVW 和 RV 间差异不显著 ($P > 0.05$); 其中, RVW 中的 $RVW1$ 和 $RVW2$ 显著大于 $RVW3$ ($P < 0.05$), RV 中的 $RV1$ 显著大于 $RV2$ 和 $RV3$ ($P < 0.05$), RF 中的 $RF1$ 和 $RF2$ 显著大于 $RF3$ ($P < 0.05$), 其他样点各小区间差异均不显著 ($P > 0.05$)。对于 Simpson 优势集中性指数, RF 显著大于 RVW 和 RV ($P < 0.05$), RVW 和 RV 间差异不显著 ($P > 0.05$); RVW 和 RV 各自小区间均相互差异显著 ($P < 0.05$), 其他样点中的各小区间差异均不显著 ($P > 0.05$) (图 5)。

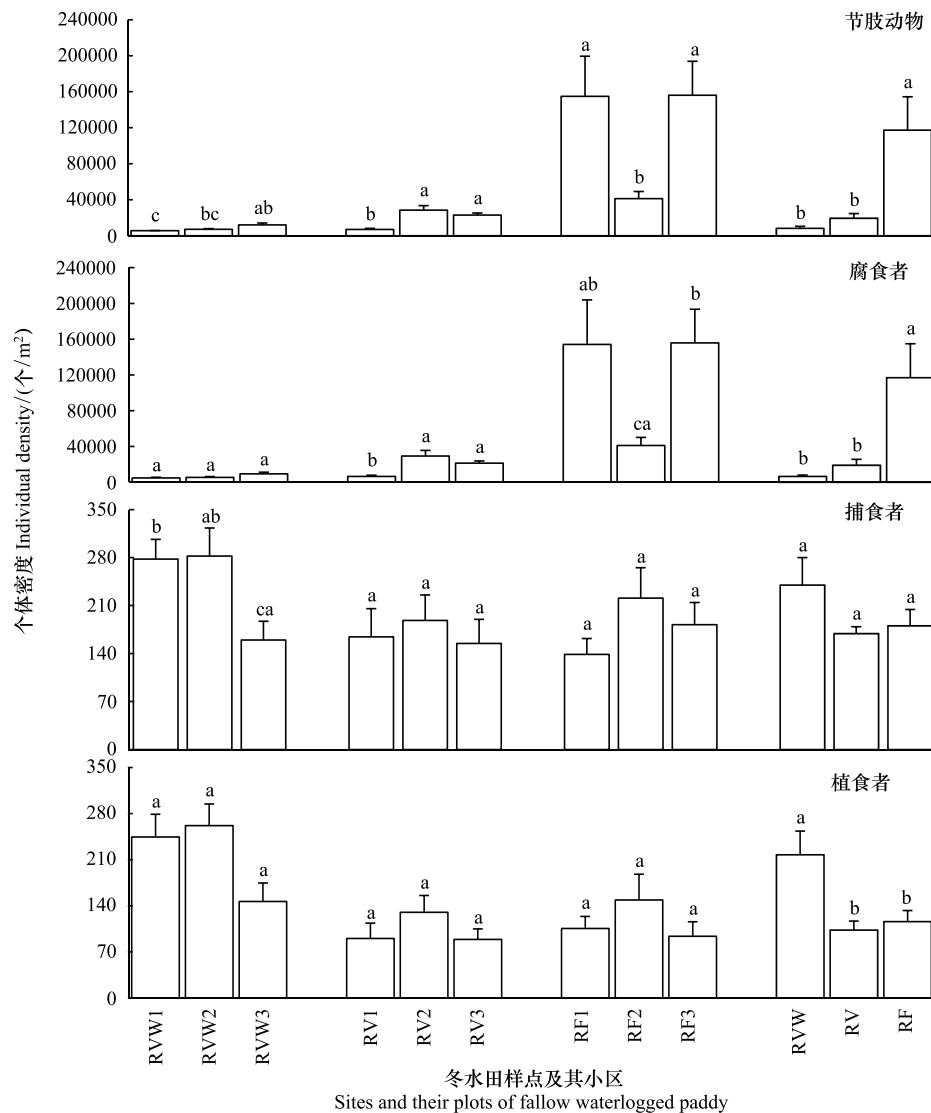


图3 不同休耕期冬水田调查点节肢动物群落密度(平均值±标准误)

Fig.3 Densities of arthropod community in FWPFs and their plots of three sites (Mean±SE)

RVW1:水稻、蔬菜和荒地耕作区小区1, The first plot of mixed areas of rice, vegetables and wasteland; RVW2:水稻、蔬菜和荒地耕作区小区2, The second plot of mixed areas of rice, vegetables and wasteland; RVW3:水稻、蔬菜和荒地耕作区小区3, The third plot of mixed areas of rice, vegetables and wasteland; RV1:水稻和蔬菜耕作区小区1, The first plot of mixed areas of rice and vegetables; RV2:水稻和蔬菜耕作区小区2, The second plot of mixed areas of rice and vegetables; RV3:水稻和蔬菜耕作区小区3, The third plot of mixed areas of rice and vegetables; RF1:水稻和林地耕作区小区1, The first plot of mixed areas of rice and forestland; RF2:水稻和林地耕作区小区2, The second plot of mixed areas of rice and forestland; RF3:水稻和林地耕作区小区3, The third plot of mixed areas of rice and forestland; RVW:水稻、蔬菜和荒地耕作区, The mixed areas of rice, vegetables and wasteland; RV:水稻和蔬菜耕作区, The mixed areas of rice and vegetables; RF:水稻和林地耕作区, The mixed areas of rice and forestland; 同一组图柱上字母不相同者表示在0.05显著水平上的差异显著

3.4 节肢动物群落及其功能团特征参数分析

3.4.1 密度与生物量的相关性

以3个样点各小区节肢动物群落及其主要功能团的密度和生物量作相关性分析,结果显示,两个参数间显著相关性的为节肢动物(总密度和总生物量)、腐食者和植食者($P < 0.05$),捕食者相关性不显著($P > 0.05$);通过回归分析结果比较,它们在密度和生物量间的相关性模型均可用二元线性方程式表示(表3)。

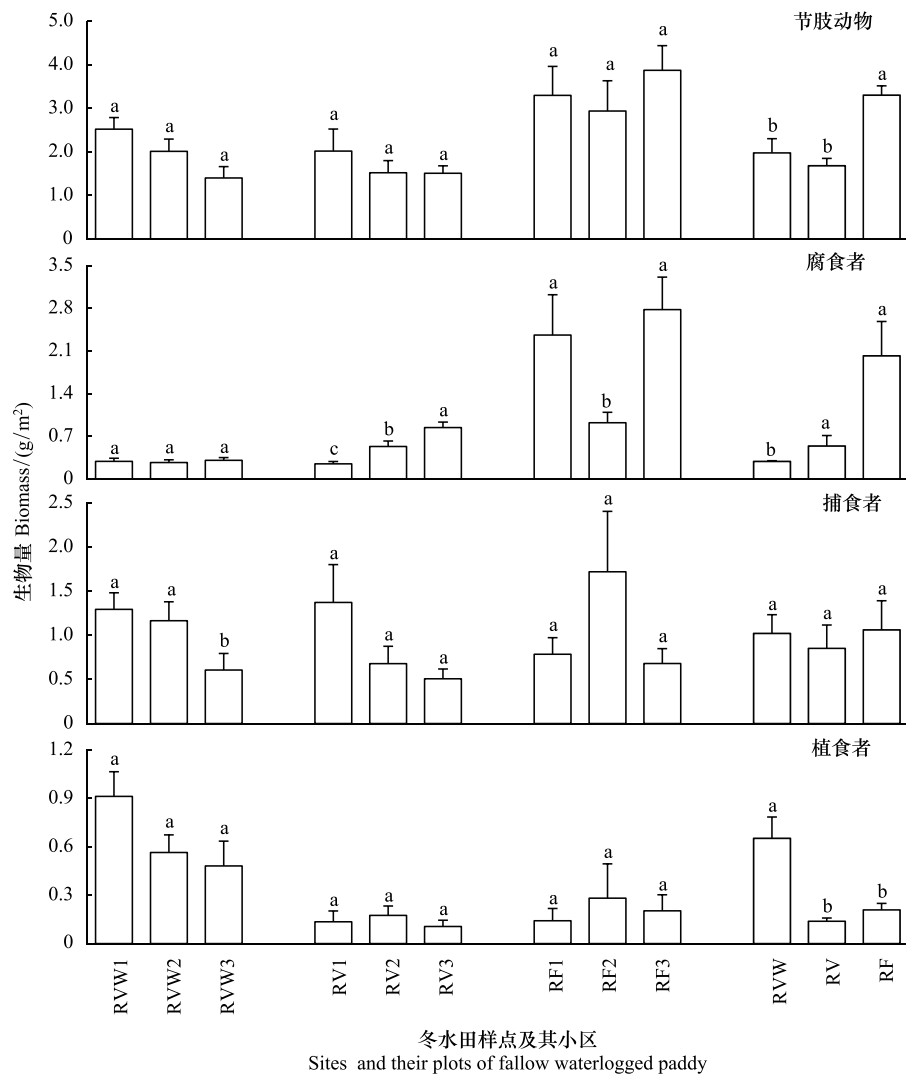


图4 三类冬水田调查点节肢动物群落及其功能团生物量(平均值±标准误)

Fig.4 Biomass of arthropod community in FWPFs and their plots of three sites (Mean±SE)

3.4.2 捕食者与其猎物的相关性

以3个样点各小区捕食者及其猎物的生物量(包括平均值)作相关性分析,结果显示,捕食者与其猎物腐食者和植食者及它们的组合间均存在极显著的相关性($P < 0.01$);根据回归结果比较分析,它们的相关性模型均适合用二元线性方程式表示;另外,腐食者和植食者的猎物组合与它们单独作为猎物相比,其与捕食者线性关系的拟合程度要更好($R^2 = 0.959, P < 0.001$)(表4)。

以3个样点各小区捕食者及其猎物的密度(包括平均值)作相关性分析,结果显示,捕食者只与植食者间存在极显著的相关性($P < 0.01$)(表5),与腐食者及腐食者和植食者组合间的相关性均不显著($P > 0.05$);根据回归结果比较分析,捕食者与植食者间的关系模型适合用二次方程式拟合表示($R^2 = 0.929, P < 0.001$)(图6)。

3.5 节肢动物群落相似性分析

以3个样点的节肢动物群落个体数计算 Gower 系数,结果显示,RV 和 RF 间的节肢动物群落组成相似度最高,其次是 RVW 和 RF,而 RVW 和 RV 差异最大;它们的 G_{jk} 分别为 0.18、0.20 和 0.25。以3个样点9个小区的节肢动物群落个体数计算 Gower 系数,结果显示,这9个小区的相似性可分为4个层次,相似性最高的两对为 RVW3 和 RF3 与 RV1 和 RF3, G_{jk} 均为 0.19;其次是 G_{jk} 介于 0.21—0.28 的 23 对;第3层次是 G_{jk} 介于 0.30—0.36 的 10 对;最后1对 RVW1 和 RVW2 的 G_{jk} 最大,为 0.44(表6)。

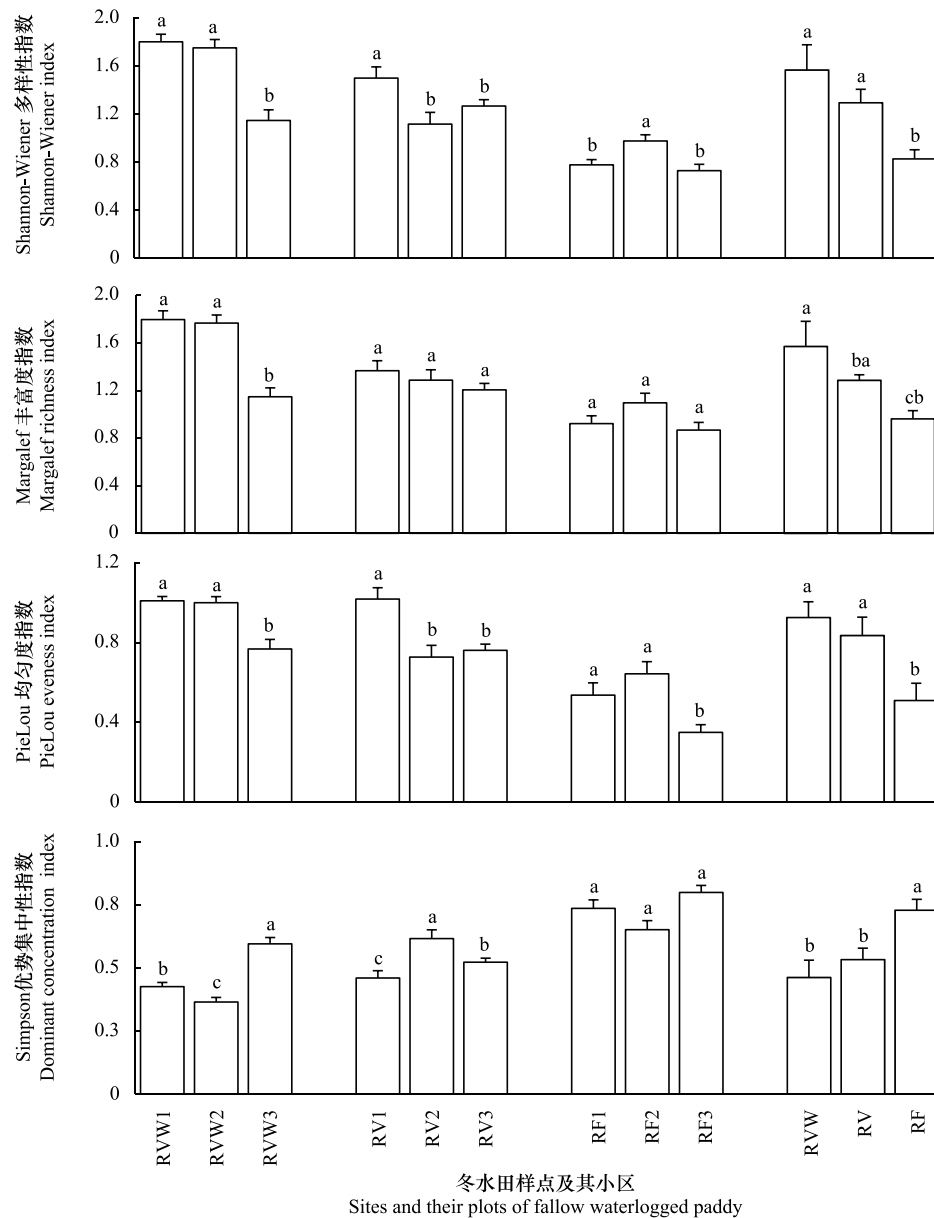


图5 三类冬水田调查点节肢动物群落多样性(平均值±标准误)

Fig.5 Diversities of arthropod community in FWPFs and their plots of three sites (Mean±SE)

表3 冬水田节肢动物群落密度与生物量的相关性及其回归分析

Table 3 The correlation and regression analysis between density and biomass of arthropod in FWPF

节肢动物及其功能团 Arthropod and its groups	相关系数 Correlation coefficient	显著水平 Significant level	R^2	回归方程* Regression equation
节肢动物 Arthropod	0.846	0.001	0.716	$Y = -91097.8 + 59667.1X$
捕食者 Predator	0.537	0.072	—	—
腐食者 Detritivore	0.989	0.000	0.978	$Y = -13542.2 + 64141.1X$
植食者 Herbivore	0.908	0.000	0.824	$Y = 73.5 + 216.1X$

Y: 节肢动物密度, Density of arthropod; X: 节肢动物生物量, Biomass of arthropod

表 4 冬水田节肢动物捕食者与猎物的生物量相关性及其回归分析

Table 4 The correlation and regression analysis between the biomass of predators and their preys in FWPF

捕食者及其猎物组合 Predator and its prey combination	相关系数 Correlation coefficient	显著水平 Significant level	R^2	回归方程* Regression equation
捕食者和腐食者 Predator and detritivore	0.867	0.002	0.756	$Y=0.001+1.992X_1$
捕食者和植食者 Predator and herbivore	0.810	0.008	0.657	$Y=0.003+1.525X_2$
捕食者和腐食者+植食者 Predator and detritivore+herbivore	0.979	0.000	0.959	$Y=-0.001+1.873X_1+1.161X_2$

Y:捕食者,Predator; X:腐食者或植食者或两者组合,Detritivore or herbivore or the combination of them

表 5 冬水田节肢动物捕食者与猎物的密度相关性及其回归分析

Table 5 The correlation and regression analysis between the density of predators and their preys in FWPF

捕食者及猎物组合 Predator and its prey combination	相关系数 Correlation coefficient	显著水平 Significant level	R^2	回归方程* Regression equation
捕食者和腐食者 Predator and detritivore	-0.422	0.171	—	—
捕食者和植食者 Predator and herbivore	0.927	0.000	0.870	$Y=139.186+0.079X+0.002X^2$
捕食者和腐食者+植食者 Predator and detritivore+herbivore	-0.422	0.172	—	—

Y:捕食者,Predator; X:植食者,Herbivore

3.6 环境因子对冬水田生境异质性的影响

3.6.1 环境因子与节肢动物群落参数的相关性

以稻田 7 个环境因子和 12 个节肢动物群落参数进行相关性分析,结果显示,节肢动物群落参数受环境因子显著影响最大的是生境类型(FH),其次是稻田蓄水量(EWQ)和稻桩生物量(BR),而种植模式(PP)和收割方式(HM)影响最小;其他各因子对节肢动物群落的参数影响均不显著。其中,FH 与 AI、AB、C、DB 和 DI 显著正相关($P<0.01$ 或 0.05),与 H' 、D、J 和 PI 显著负相关($P<0.01$ 或 0.05)。EWQ 与 H' ($P<0.05$) 和 D、HB、PI 和 HI ($P<0.01$) 显著或极显著负相关;BR 与 H' 、D、PI 和 HI ($P<0.05$) 显著正相关,与 C 显著负相关($P<0.05$);PP 和 HM 均与 PI 显著负相关($P<0.05$) (表 7)。

3.6.2 冬水田生境异质性分析

由于表 7 中 19 个环境因子和节肢动物群落参数中多数变量间存在高度的线性相关以及样本量少于指标,无法形成正定矩阵,结合该表中环境因子与节肢动物群落参数间相关性分析结果,选取 8 个对冬水田生境异质性影响较大的代表因子进行主成分分析,包括 4 个环境因子 FH、PP、EWQ 和 BR 以及 4 个节肢动物群落参数 H' 、AI、PI 和 DI。由主成分分析可知,KMO 取样足够度为 0.70,Bartlett 的球形度检验概率小于 0.01 ($\chi^2=70.66, P=0.000$),说明利用这些因子可以进行主成分分析。本研究选取的前 2 个主成分累积方差贡献率达 86.49%,认为一个 2 因子模型可解释试验数据内容的绝大部分信息(表 8)。由于总方差的 73.73% 的贡献率来自第 1 主成分,因此轴 1 (第 1 主成分) 各因子的影响力大小可认为是对冬水田各样点生境异质性起决定性的影响因素,影响力从大到小依次是 H' 、FH、AI、PI、DI、PP、EWQ 和 BR;其中 H' 、PI 和 BR 为负相关,其他为正相关;而综合排序结果显示,影响力最大的前 3 位因子是 AI、DI 和 FH (表 9)。

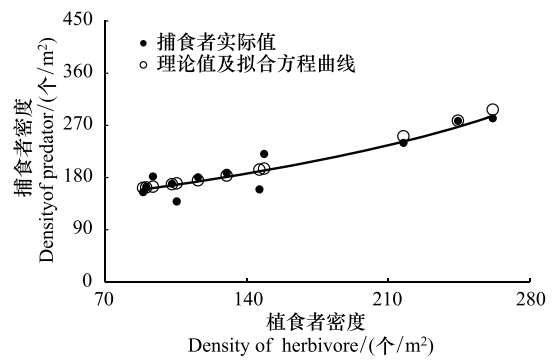


图 6 冬水田节肢动物捕食者与植食者密度的二次方程拟合曲线

Fig. 6 The fitted curves of quadratic equation between the densities of predators and herbivores in FWPF plots

表 6 基于 Gower 系数的 3 类冬水田各小区节肢动物群落相似性比较

Table 6 Similarity comparison of arthropod community in FWPF plots of three sites based on Gower index									
各样点小区 Plots of three sites	RVW1	RVW2	RVW3	RV1	RV2	RV3	RF1	RF2	RF3
RVW1	—								
RVW2	0.44	—							
RVW3	0.31	0.35	—						
RV1	0.28	0.32	0.23	—					
RV2	0.30	0.34	0.27	0.25	—				
RV3	0.28	0.33	0.28	0.22	0.28	—			
RF1	0.28	0.32	0.24	0.24	0.26	0.24	—		
RF2	0.31	0.36	0.25	0.25	0.26	0.23	0.26	—	
RF3	0.26	0.30	0.19	0.19	0.23	0.21	0.25	0.23	—

表 7 环境因子与冬水田节肢动物群落参数的相关性分析

Table 7 The correlation analysis between environmental factors and parameters of arthropod community in FWPF plots							
节肢动物群落参数 Parameters of arthropod community	生境类型 Farmland habitat types	种植模式 Planting patterns	收割方式 Harvesting methods	蓄水量 Evaluation of water quantity	稻秆高度 Height of rice stubs	稻桩密度 Density of rice stubs	稻桩生物量 Biomass of rice straws
AI	0.896 **	0.546	0.546	0.361	-0.219	-0.479	-0.305
AB	0.685 *	0.613	0.613	0.086	-0.216	-0.643	-0.298
H'	-0.843 **	-0.639	-0.639	-0.757 *	0.562	0.456	0.704 *
D	-0.791 *	-0.595	-0.595	-0.828 **	0.664	0.385	0.731 *
J	-0.791 *	-0.528	-0.528	-0.577	0.457	0.410	0.575
C	0.843 **	0.641	0.641	0.621	-0.502	-0.441	-0.674 *
PB	0.158	0.193	0.193	-0.344	-0.018	-0.281	-0.012
DB	0.791 *	0.520	0.520	0.365	-0.215	-0.487	-0.300
HB	-0.369	-0.461	-0.461	-0.832 **	0.503	0.459	0.464
PI	-0.685 *	-0.686 *	-0.686 *	-0.950 **	0.019	0.456	0.790 *
DI	0.791 *	0.503	0.503	0.357	-0.128	-0.467	-0.236
HI	-0.211	-0.608	-0.608	-0.824 **	0.608	0.293	0.703 *

* $P<0.05$; ** $P<0.01$; AI: 节肢动物群落密度, Density of arthropod; AB: 节肢动物群落生物量, Biomass of arthropod; H': Shannon-Wiener 多样性指数, Shannon-Wiener diversity index; D: Margalef 丰富度指数, Margalef richness index; J: Pielou 均匀度指数, Pielou evenness index; C: Simpson 优势集中性指数, Dominant concentration index of Simpson; PB: 捕食者生物量, Biomass of predator; DB: 腐食者生物量, Biomass of detritivore; HB: 植食者生物量, Biomass of herbivore; PI: 捕食者密度, Density of predator; DI: 腐食者密度, Density of detritivore; HI: 植食者密度, Density of herbivore

表 8 影响冬水田生境差异的各因子主成分特征根与方差贡献率

Table 8 Eigenvalue and variance contribution of principal components in different influential factors affecting the difference of FWPF plots			
主成分 Principal component	特征根 Eigenvalues	方差贡献率/% Variance contribution	累积方差贡献率/% Cumulative variance contribution
1	5.90	73.73	73.73
2	1.02	12.77	86.49

基于上述 8 个生物和非生物影响因素 PCA 得分的冬水田排序结果如图 7 所示。由图 7 可知,3 个冬水田样点排序图显示出了明显的生境异质性差异,RVW、RV 和 RF 三者间的差异均较大;其中,RVW 受 BR、PI 和 EWQ 影响较大,且正或负相关;RF 受 DI 和 AI 影响较大,均呈正相关;RV 受这些因子的影响均较小,但与 EWQ 和 H'关系较密切,均呈正相关,说明小区间的生境条件差异很大。此外,由图 7 还可知,节肢动物群落参数 PI 和 BR、AI 和 DI、FH 和 PP 等的相关性均较强;对第一轴(第 1 主成分)影响最大的是 H'、FH 和 AI,各因子对第二轴(第 2 主成分)的影响均较小。利用上述 19 个生物和非生物影响因素对 9 个冬水田小区聚类,

结果可分为 3 类,RF1 和 RF3 聚为一类,RV1、RV2 和 RF3 聚为一类,RVW1、RVW1、RVW3 和 RV3 聚为一类;RV 和 RF 小区生境差异较大,而 RVW 间差异最小;该结果进一步说明了 3 类冬水田各小区(小生境)间也存在明显的生境异质性(图 8)。

表 9 影响冬水田生境差异的各因子的主成分值

Table 9 The values of principal components in different influential factors affecting the difference of FWPF plots				
指标 Index	主成分 1 Principal component 1	主成分 2 Principal component 2	综合分值 Comprehensive values	排序 Rank
FH	0.383	0.043	0.333	3
PP	0.331	-0.342	0.232	4
EWQ	0.315	-0.302	0.224	5
BR	-0.310	0.505	-0.190	6
AI	0.379	0.380	0.379	1
H'	-0.393	-0.186	-0.362	8
PI	-0.373	0.161	-0.294	7
DI	0.333	0.575	0.369	2

FH:生境类型,Farmland habitat types;PP:种植模式,Planting patterns;EWQ:蓄水量,Evaluation of water quantity;BR:稻桩生物量,Biomass of rice straws

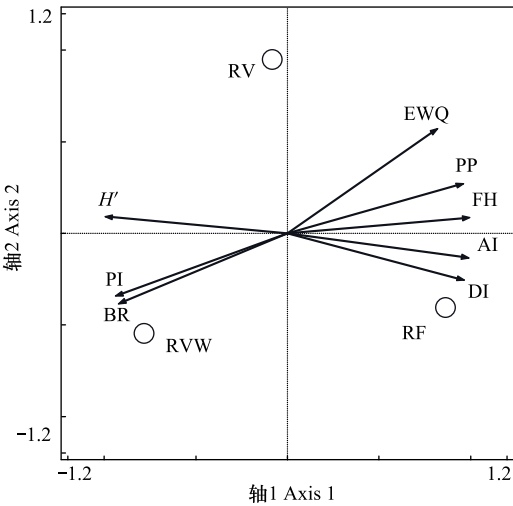


图 7 基于节肢动物群落多样性特征参数及环境因子 PCA 得分的冬水田类型排序图

Fig.7 PCA ordination diagram of different sites based on characteristic parameters of community diversity of arthropods and environmental factors in FWPF

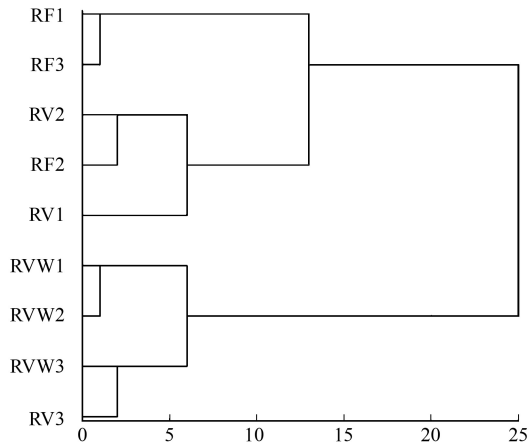


图 8 基于环境因素及节肢动物群落特征参数的冬水田不同生境类型小区聚类分析

Fig.8 The analysis map of hierarchical cluster on the similarity of different plots in three sites based on the environmental factors and community parameters of arthropods in FWPF plots

4 结论与讨论

4.1 冬水田节肢动物群落组成及多样性和生物量特征

目前,鲜有单季中稻区休耕期冬水田节肢动物群落的研究报道。本研究发现,重庆单季稻区休耕期冬水田节肢动物群落隶属于 3 纲 119 科(种),按功能团可分为腐食者、捕食者、植食者、寄生者和杂食者。但从个体数或密度分析,腐食者相对多度超过了 97%,是占绝对主导位置的功能群;而从生物量分析,捕食者和腐食者相对生物量之和超过了 86%,是对冬水田节肢动物群落的发生起主要作用的功能群。另外,蓄水较少的冬

水田杂草较多,这也造成植食者的数量和生物量所占比重较大。优势度指数结果指出,冬水田节肢动物群落以罕见或稀少种(类群)数量最多以及优势类群数量稀少且突出为最主要特征。优势类群主要是腐食者中的圆蚋科和长角蚋科。常见种(类群)主要为腐食者中的类群,如摇蚊科、细蚊科、蛾蚋科、蚋科和大蚊科等;这些双翅目腐食者多数类群主要滋生与湿地及植物残体腐败生境中,它们在幼虫阶段以腐食性为主,也能对水稻残体的降解起到促进作用。偶见种(类群)主要有捕食者中蜘蛛和一些鞘翅目甲虫以及植食者中的一些昆虫类群。罕见或稀少种(类群)广泛分布于捕食者中的蛛形纲和昆虫纲中。我们的这些研究结果明显与一些相关的研究不同。张洁等^[16]对双季稻区冬闲田及其周边非稻田生境越冬节肢动物群落的调查发现,植食性昆虫种类最多,其次是捕食者(昆虫和蜘蛛),寄生者和腐食类(中性昆虫)最少,主要优势种为不同种类的蜘蛛。刘其全等^[17]对福建省武夷山稻田生境内的越冬节肢动物群落进行调查,结果表明,捕食者(昆虫和蜘蛛)种类最多,其次是寄生者,然后是植食者和腐食者(中性昆虫)。张娟等^[18]发现越冬稻田生境内节肢动物群落隶属于3纲9目,包括7类捕食性蜘蛛和昆虫、3类害虫以及3类中性昆虫。王智^[19]开展了洞庭湖平原越冬稻田蜘蛛群落的调查,发现了8科16属21种,其中拟水狼蛛和食虫沟瘤蛛为优势种。根据我们前期调查,重庆休耕期稻田腐食类以弹尾虫为主,占节肢动物个体数的60%以上,主要是长角蚋科、圆蚋科和球角蚋科中的一些种类,而捕食者主要是蜘蛛;其中灰橄榄长角蚋 *Entomobrya griseoolivata* 通过进一步鉴定,应该修订为长角蚋科中2个种,即天台刺齿蚋 *Homidia tiantaiensis* 和纵纹刺齿蚋 *H. socia*^[5,21-22];重庆稻区稻田蜘蛛包括16科46属89种^[20],而在稻田休耕季节丰富度最高的几个蜘蛛种类包括食虫沟瘤蛛 *Ummeliata insecticeps*、草间小黑蛛 *Erigonidium graminicolum*、纵条蝇狮 *Marpissa magister*、棕管巢蛛 *Clubiona japonicola* 和拟水狼蛛 *Pirata subpiraticus*^[5]。其他在采后免耕稻田的调查显示,弹尾虫优势功能类群是球角蚋科、长角蚋科和等节蚋科^[29]。由于稻田生育期和休耕期生态系统密切相关,因此2012年9—10月在对我国主要稻区(除西北地区外)地表/落叶层中的弹尾虫种类调查中发现,稻田系统弹尾虫的种类至少包括6科21种以上,不同稻区种类差异较大,如长角蚋科、爪蚋科、圆蚋科、等节蚋科、球角蚋科和棘蚋科等中的种类;部分种类广布且常年大量发生在稻田地表水稻或杂草植株残体中,如爪蚋科弯齿蚋 *Akabosia* sp.在各地广布且在10月初沈阳水稻黄熟期稻田密度及相对多度极高,而长角蚋科刺齿蚋 *Homidia* spp.在各地广布且大量发生于水稻黄熟期及休耕季节稻田中(作者内部资料)。祝向钰等^[30]在水稻生育期的调查发现,土壤弹尾虫类群包括长角蚋科、钩圆蚋科、齿棘圆蚋科、棘蚋科、球角蚋科和等节蚋科。

另外,本研究也发现,节肢动物群落密度和生物量间存在显著线性相关性,如节肢动物(总密度和总生物量)、腐食者和植食者;因此本研究中用节肢动物群落的密度分析了节肢动物群落的多样性特征参数;尽管如此,在分析捕食者和猎物间的营养关系时,发现生物量比密度更能准确地反映2者间的营养关系。师光禄等^[31]认为以物种生物量的大小作为多样性测度指数,能较客观地反映物种在生物群落中的作用,研究得出的结果灵敏性更高。另外,戈峰等^[32]通过个体数和生物量等数据计算,比较了节肢动物群落的数量与能流多样性特征,认为能流量多样性指数比数量多样性指数变化更为敏感,更能反映害虫与天敌的群落特征。

4.2 冬水田水稻秸秆与节肢动物群落的生态关系分析

与水稻生育期稻田相比,冬水田系统中大量存在的水稻秸秆(稻桩)决定了该季节稻田系统中节肢动物群落功能团间的基本生态关系。本研究发现,重庆冬水田系统腐食者以弹尾虫为主,且圆蚋科和长角蚋科是该冬水田休耕期仅有的2个优势类群;蜘蛛是捕食者中的优势类群;从生物量分析,捕食者及其猎物(腐食者)间存在显著正相关性,说明弹尾虫是该季节蜘蛛等捕食者的重要猎物。虽然稻田是一个开放的生境,稻田内外节肢动物间存在着密切的互动或交流^[33],但基于上述研究结果,可以认为冬水田“水稻秸秆(稻桩)—腐食者—捕食者”间存在营养级联反应。营养级联反应(Cascading trophic interactions)^[34]主要思想是某一营养级的生产力由该系统中捕食者的生物量限定,食物网顶端捕食者捕食作用在营养级中自上向下传递影响初级生产力。上行/下行理论(Bottom-up/top-down theory)^[35]综合了资源营养物质的上行作用和捕食者捕食作用的下行影响。虽然两者间在概念的表述上存在差异,实际上并无本质区别,都是以捕食者为调控的主要因

子的理论,可看做为同一理论体系。尽管上述理论的提出是基于水体食物网生态系统,但长期以来生态学家已证明了上述反应或理论广泛地存在于陆地生态系统的食物网中,是决定陆地生物群落组建和生态系统功能的重要因子。例如,在草地生态系统中,凋落物移除后再重置于控制区,导致狼蛛的种类和数量显著增加^[36];在落叶林地凋落物层碎屑食物网中,随着食物网中资源库营养物质的增加,试验小区弹尾虫和隐翅虫及步甲等主要捕食者的密度也相应成倍增加^[37];而在林地生态系统中的试验表明,弹尾虫等分解者的数量与累积的有机物量呈正相关^[38]。蜘蛛的捕食能降低枯枝落叶层弹尾虫的发生密度,从而削弱凋落物的消失率(Rate of litter disappearance)^[39]。尽管如此,在本研究中,没有发现水稻秸秆(稻桩)生物量与腐食者的生物量间存在显著相关性,甚至还是负相关(差异不显著, $P>0.05$);这是因为秸秆多的冬水田显著增加了节肢动物群落的多样性(H')和丰富度(D)($P<0.05$),导致捕食者的猎物种类增加,如植食者(与捕食者正相关,但差异不显著 $P>0.05$);此外,也与稻田其他因素密切相关,特别是蓄水量。水稻秸秆生物量与蓄水量对捕食者和腐食者的影响完全相反,水多的稻田腐食者多,但捕食者数量少;可能是水多抑制了捕食者种类和数量,且降低了捕食者的捕食效率,导致猎物数量上升,具体的作用机理有待进一步深入的研究。

目前在稻田生态系统中,研究弹尾虫的生态功能主要集中于水稻生育期,且将弹尾虫的生态功能定义为“中性”^[40-41]。但在水稻收割后冬水田休耕季节,主要害虫(或植食性)种类密度显著降低甚至于再生稻采收后数量非常稀少,而弹尾虫的数量或密度却非常大;由此可知这些腐食者的生态功能已不是水稻生育期建立在“水稻—害虫—天敌”三营养系统下的“中性”或主要作为天敌的猎物,而是承担着冬水田休耕季节主要营养系统“水稻稻秆(稻桩)—腐食类(弹尾虫)—捕食者”中承上启下的双重生态功能,即能促进对水稻残体的分解又作为捕食者的主要猎物,这就决定了其在该系统的“中心”位置,是影响系统的关键因子,可看作系统“关键或中心”节肢动物类群。我们前期的研究表明,冬水田休耕季节稻田6科11种蜘蛛均捕食弹尾虫,DNA阳性检出率超过了69.0%^[5]。此外,作物生育期大量的研究表明,无论是间接的途径还是直接的捕食证据都说明,弹尾虫是蜘蛛等捕食者的重要猎物源,如通过田间观察^[9,42-43]、室内捕食功能反应^[44]、单克隆抗体^[45]、稳定同位素^[46]以及DNA分子技术^[47-48]等。同时,在植物残体降解过程中,弹尾虫担负着重要的分解者的角色。如在室内模拟“凋落物质量—土栖动物对凋落物的破碎化—弹尾虫密度”3者间多营养相互关系的研究表明,弹尾虫的存在可提高凋落物质量损失率和C、N养分的矿化率,从而加速凋落物的降解^[49]。在分子水平上,利用同位素示踪法研究发现,弹尾虫能调节进入土壤中的有机质养分,特别是直接作用于植物残体中有机C养分的土壤转移^[50]。

4.3 环境因素对冬水田节肢动物群落组成及多样性特征的影响

本研究结果表明,冬水田典型生境类型间在节肢动物及其功能团的密度和生物量上均出现了显著性差异;而节肢动物群落多样性特征参数在各类型冬水田中呈明显的规律变化,也出现了显著差异,包括Shannon-Wiener多样性指数、Margalef丰富度指数、Pielou均匀度指数和Simpson优势集中性指数;而造成这些变化的原因应该与各冬水田生境条件的不同密切相关,特别是稻田周围的非作物生境。由于短期农作物生境内节肢动物群落存在群落重建的过程,而非作物生境内的节肢动物群落又称之为作物生境内节肢动物群落的种库^[8,51];因此,3类冬水田节肢动物群落组成和多样性特征参数的变化也会因为它们非稻田生境节肢动物群落的不同而受到重大影响。研究也指出,越冬节肢动物群落在冬闲田和非稻田生境优势类群和多样性特征参数上明显不同^[16]。另外,水稻生育期的大量研究也表明,稻田与非稻田生境区节肢动物及其功能团在种类组成及多样性参数上既表现出了相似性,也出现了较大差异^[12-15]。而在同一地区不同稻田生境,节肢动物群落的结构是基本相似的,但不同生境区的景观及生态条件也会导致群落的差异^[11]。冬季油菜田周围不同非作物景观结构能特殊地影响菜田豹蛛*Pardosa agrestis*的活动密度和适合度相关的特性(体型大小和繁殖力);当菜地周围带状杂草路长度最大且距离相邻杂草休耕地最小时,该豹蛛的活动密度达最高;豹蛛体型大小及其活动密度与这个带状路长度呈负相关,但与菜地近邻的林分面积正相关;豹蛛窝卵数与其体型大小正相关^[24]。

利用节肢动物群落相似性比较不同冬水田及其小区的生境异质性时发现,冬水田节肢动物组成变化较小,但受环境因素的影响也出现了较大不同。在这些环境因素中,节肢动物群落参数受环境因子显著影响最大的是生境类型,其次是稻田蓄水量和稻桩生物量,而种植模式和收割方式影响最小。主成分分析结果指出,3类冬水田生境异质性差异较大,而影响这种差异的生物和非生物因素存在明显不同;而聚类分析结果进一步表明了这种差异也与它们小区的微生境异质性变化存在紧密的相关性。研究指出,作物种植、管理和收割过程中的所有耕作措施或方式以及生境条件均不同程度地影响到农作物生境中节肢动物群落及其功能团的重建^[9-10,51];要特别对蜘蛛等捕食天敌开展保护策略^[52]。另外,稻田生境中水的有无也能对稻田蜘蛛捕食功能产生明显影响^[53]。研究发现,稻田有机物的增加与捕食者的丰度正相关,主要原因是这些有机物促进了天敌的猎物即腐食者的种群数量^[54]。在小麦生长后期,保护性耕作农田的弹尾虫丰度显然要高于传统耕作田,但不同种类的弹尾虫对这两种耕作系统有不同偏好性,如土蚘 *Mesaphorura krausbaueri* 是保护田中的绝对优势种,而等节蚘 *Folsomia fimetaria* 在传统田中发生量较大^[55]。总之,环境因素对冬水田节肢动物群落的影响更多地体现在耕作制度和稻田生境管理措施或方式上,由于目前在这方面的研究工作非常欠缺;因此,为了更好的管理冬水田系统,让其既能满足蓄水的主要作用,并能促进稻田秸秆的降解和捕食天敌的群落重建等生态功能,应不断加强该领域的相关基础研究。

致谢:西南大学周远红、廖佳铎和张文等同学协助了田间调查;美国密苏里大学教授 Qisheng Song 教授帮助修改了论文,在此一并致以衷心感谢。

参考文献 (References):

- [1] 陈桂权. 四川冬水田的历史变迁. 古今农业, 2014, (1): 83-91.
- [2] 刘继福. 恢复冬水田势在必行. 四川水利, 2005, 26(5): 44-45.
- [3] 马秀梅, 朱波, 杜泽林, 郑循华. 冬水田休闲期温室气体排放通量的研究. 农业环境科学学报, 2005, 24(6): 1199-1202.
- [4] 魏朝富, 高明, 黄勤, 车福才, 杨剑虹, 谢德体, 蔡祖聪, 徐华. 耕种制度对西南地区冬水田甲烷排放的影响. 土壤学报, 2000, 37(2): 157-165.
- [5] 庞帅, 王超, 王光华, 王雪芹, 祝增荣, 白耀宇. 利用 18S rDNA 分析冬水田蜘蛛对弹尾虫的捕食作用. 植物保护学报, 2017, 44(6): 1011-1016.
- [6] Neher D A, Weicht T R, Barbercheck M E. Linking invertebrate communities to decomposition rate and nitrogen availability in pine forest soils. Applied Soil Ecology, 2012, 54: 14-23.
- [7] Chang L, Wu H T, Wu D, Sun X. Effect of tillage and farming management on Collembola in marsh soils. Applied Soil Ecology, 2013, 64: 112-117.
- [8] 张文庆, 古德祥, 张古忍. 论短期农作物生境中节肢动物群落的重建 I. 群落重建的概念及特性. 生态学报, 2000, 20(6): 1107-1112.
- [9] 张文庆, 古德祥, 张古忍. 论短期农作物生境中节肢动物群落的重建 II. 群落重建的分析和调控. 生态学报, 2001, 21(6): 1020-1024.
- [10] Björkman C, Bommarco R, Eklund K, Höglund S. Harvesting disrupts biological control of herbivores in a short-rotation coppice system. Ecological Applications, 2004, 14(6): 1624-1633.
- [11] 尤民生, 陶方玲, 庞雄飞. 稻田节肢动物群落相似性的研究. 华南农业大学学报, 1991, 12(2): 23-28.
- [12] 陶方玲, 梁广文, 庞雄飞. 不同生境区稻田节肢动物群落动态分析. 华南农业大学学报, 1996, 17(1): 25-30.
- [13] 俞晓平, 胡萃, Heong K L. 非作物生境对农业害虫及其天敌的影响. 中国生物防治, 1996, 12(3): 130-133.
- [14] 刘雨芳, 古德祥, 张古忍. 广东双季稻区杂草地和稻田中捕食性节肢动物的群落动态. 昆虫学报, 2003, 46(5): 591-597.
- [15] 张古忍, 古德祥, 张文庆. 稻田捕食性节肢动物群落的种库与群落的重建. 中国生物防治, 1997, 13(2): 65-68.
- [16] 张洁, 胡良雄, 刘杰, 凌善峰, 陈海东, 张润杰. 稻田与非稻田生境越冬节肢动物群落调查与分析. 中山大学学报: 自然科学版, 2010, 49(5): 118-121.
- [17] 刘其全, 姚凤奎, 郑云开, 林胜, 尤民生. 武夷山稻田生境越冬节肢动物群落的物种组成. 华东昆虫学报, 2007, 16(1): 30-35.
- [18] 张娟, 曾玲, 梁广文, 陆永跃. 稻田越冬害虫及其捕食性节肢动物类群的空间分布动态. 环境昆虫学报, 2010, 32(3): 299-306.
- [19] 王智. 洞庭湖平原稻田蜘蛛群落越冬生态分析. 河北师范大学学报: 自然科学版, 2002, 26(3): 295-296, 308-308.
- [20] 李剑泉, 赵志模, 朱文炳, 侯丽娜, 周彦, 李雪燕. 重庆市稻田动物群落及农田蜘蛛资源考察. 西南农业大学学报, 2001, 23(4): 312-316.
- [21] 闫瑞红, 白耀宇, 程家安, 叶恭银. Bt 稻 Cry1Ab 蛋白的表达和降解及对采后季节土表灰橄榄长角跳虫发生的影响. 植物保护学报, 2009, 36(5): 431-436.

- [22] Bai Y Y, Yan R H, Ye G Y, Huang F N, Cheng J A. Effects of transgenic rice expressing *Bacillus thuringiensis* Cry1Ab protein on ground-dwelling collembolan community in postharvest seasons. *Environmental Entomology*, 2010, 39(1): 243-251.
- [23] 徐富贤, 张林, 熊洪, 周兴兵, 蒋鹏, 朱永川, 郭晓艺, 刘茂. 不同栽培方式对杂交中稻产量及冬水田肥力的影响. *中国稻米*, 2017, 23(2): 27-31.
- [24] Drapela T, Frank T, Heer X, Moser D, Zaller J G. Landscape structure affects activity density, body size and fecundity of *Pardosa* wolf spiders (Araneae: Lycosidae) in winter oilseed rape. *European Journal of Entomology*, 2011, 108(4): 609-614.
- [25] 俞晓平, 吕仲贤, 陈建明, 郑许松, 徐红星, 陶林勇, Heong K L. 水稻害虫及其天敌在生境间迁移的监测方法和原理. *浙江农业学报*, 1999, 11(6): 325-332.
- [26] 施波, 姚凤奎, 陈少波, 尤民生. 陷阱法的改进及其在稻田蜘蛛取样中的应用. *应用昆虫学报*, 2011, 48(3): 782-786.
- [27] 徐国良, 莫江明, 周国逸. 氮沉降对三种林型土壤动物群落生物量的影响. *动物学研究*, 2005, 26(6): 609-615.
- [28] 钱迎倩, 马克平. 生物多样性研究的原理与方法. 北京: 中国科学技术出版社, 1994.
- [29] Widayastuti R. Population dynamics of microarthropods (Oribatida and Collembola) in rainfed paddy field ecosystem in Pati, central Java. *Jurnal Ilmu Tanah & Lingkungan*, 2005, 7(1): 11-14.
- [30] 祝向钰, 李志毅, 常亮, 袁一扬, 戈峰, 吴刚, 陈法军. 转 Bt 水稻土壤跳虫群落组成及其数量变化. *生态学报*, 2012, 32(11): 3546-3554.
- [31] 师光禄, 席银宝, 王海香, 李捷, 赵飞. 枣园节肢动物群落的数量与生物量多样性特征分析. *林业科学*, 2004, 40(2): 107-112.
- [32] 戈峰, 李典谟, 谢宝瑜, 丁岩钦, 刘向辉. 棉田节肢动物群落的数量与能流量多样性特征分析. *生态学报*, 2000, 20(6): 971-976.
- [33] 刘志龙, 王连生, 杜一新, 俞晓平, 吕仲贤, 郑许松, 梅晓青, 潘慧萍. 捕食性天敌在单季稻田与非稻田生境间的迁移规律及其保护利用. *浙江农业学报*, 1999, 11(6): 344-348.
- [34] Carpenter S R, Kitchell J F, Hodgson J R. Cascading trophic interactions and lake productivity: fish predation and herbivory can regulate lake ecosystems. *BioScience*, 1985, 35(10): 634-639.
- [35] McQueen D J, Post J R, Mills E L. Trophic relationships in freshwater pelagic ecosystems. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1986, 43(8): 1571-1581.
- [36] Patrick L B, Kershner M W, Fraser L H. Epigeal spider responses to fertilization and plant litter: testing biodiversity theory at the ground level. *Journal of Arachnology*, 2012, 40(3): 309-324.
- [37] Chen B R, Wise D H. Bottom-up limitation of predaceous arthropods in a detritus-based terrestrial food web. *Ecology*, 1999, 80(3): 761-772.
- [38] Saitoh S, Fujii S, Takeda H. Evaluation of the bottom-up force of accumulated organic matter on microarthropods in a temperate forest floor. *European Journal of Soil Biology*, 2011, 47(6): 409-413.
- [39] Lawrence K L, Wise D H. Spider predation on forest-floor Collembola and evidence for indirect effects on decomposition. *Pedobiologia*, 2000, 44(1): 33-39.
- [40] 吴进才, 胡国文, 唐健, 束兆林, 杨金生, 万志农, 任正才. 稻田中性昆虫对群落食物网的调控作用. *生态学报*, 1994, 14(4): 381-386.
- [41] 郭玉杰, 王念英, 蒋金炜, 陈俊炜, 唐建. 中性昆虫在稻田节肢动物群落中作为捕食者营养桥梁作用的研究. *中国生物防治*, 1995, 11(1): 5-9.
- [42] 刘雨芳, 古德祥. 稻田中性昆虫多样性及其生态功能分析. *中国生物防治*, 2002, 18(4): 149-152.
- [43] 尤民生, 侯有明, 刘雨芳, 杨广, 李志胜, 蔡鸿娇. 农田非作物生境调控与害虫综合治理. *昆虫学报*, 2004, 47(2): 260-268.
- [44] 庞保平, 程家安, 王启法. 稻田蜘蛛对弹尾虫的功能反应及选择作用. *植物保护学报*, 1998, 25(3): 193-196.
- [45] 赵伟春, 王光华, 程家安, 陈正贤. 弹尾虫单克隆抗体的制备及其在捕食研究中的应用. *生态学报*, 2007, 27(9): 3694-3700.
- [46] Park H H, Lee J H. Arthropod trophic relationships in a temperate rice ecosystem: a stable isotope analysis with $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$. *Environmental Entomology*, 2006, 35(3): 684-693.
- [47] Agustí N, Shayler S P, Harwood J D, Vaughan I P, Sunderland K D, Symondson W O C. Collembola as alternative prey sustaining spiders in arable ecosystems: prey detection within predators using molecular markers. *Molecular Ecology*, 2003, 12(12): 3467-3475.
- [48] Kuusk A K, Agustí N. Group-specific primers for DNA-based detection of springtails (Hexapoda: Collembola) within predator gut contents. *Molecular Ecology Resources*, 2008, 8(3): 678-681.
- [49] Yang X D, Yang Z, Warren M W, Chen J. Mechanical fragmentation enhances the contribution of Collembola to leaf litter decomposition. *European Journal of Soil Biology*, 2012, 53: 23-31.
- [50] Chamberlain P M, McNamara N P, Chaplow J, Stott A W, Black H I J. Translocation of surface litter carbon into soil by Collembola. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(9): 2655-2664.
- [51] 张文庆, 张古忍, 古德祥. 论短期农作物生境中节肢动物群落的重建 III. 群落重建与天敌保护利用. *生态学报*, 2001, 21(11): 1927-1931.
- [52] 王洪全. 中国稻区蜘蛛群落结构和功能的研究. 长沙: 湖南师范大学出版社, 2006.
- [53] 杨国庆, 吴进才, 王洪全, 姜永厚, 邱慧敏. 水对稻田蜘蛛捕食功能的影响. *生态学报*, 2003, 23(4): 681-687.
- [54] Settle W H, Ariawan H, Astuti E T, Cahyana W, Hakim A L, Hindayana D, Lestari A S. Managing tropical rice pests through conservation of generalist natural enemies and alternative prey. *Ecology*, 1996, 77(7): 1975-1988.
- [55] Dittmer S, Schrader S. Longterm effects of soil compaction and tillage on Collembola and straw decomposition in arable soil. *Pedobiologia*, 2000, 44(3/4): 527-538.