有机肥对稻田节肢动物群落的影响及其 Top-down 效应*

阳 菲** 杨 荷 赵文华 刘雨芳***

（湖南科技大学生命科学学院，园艺作物病虫害治理湖南省重点实验室，湘潭 411201）

摘 要 **【目的】** 探索稻田施用有机肥对稻田节肢动物群落、捕食性天敌与水稻害虫的影响，是否会引起水稻重要害虫发生风险。**【方法】** 2017-2018 年连续 2 年种植单季稻，在稻田中施用有机肥（Rice paddy field used organic manure，RPOM），以常规施用化肥稻田（Rice paddy field used chemical fertilizer，RPCF）为对照，调查 RPOM 与 RPCF 的土壤肥力、稻田水生昆虫、捕食性天敌总体、稻田蜘蛛、稻田捕食性昆虫（地上部分）、水稻害虫及捕食性天敌的补偿猎物等功能团的发生时间动态与相关性，计算物种益害比与个体数量益害比。**【结果】** 土壤中的碱解氮、有效磷、全磷、全钾的含量为 RPOM 显著高于 RPCF（$P<0.05$），全氮与有机质含量 RPOM 极显著高于 RPCF（$P<0.01$）。RPCF 中水生昆虫的个体数量明显低于 RPOM。摇蚊与弹尾虫的总个体数量 RPOM 与 RPCF 没有显著差异。2017 年在 RPOM 中采集到水稻害虫 17 种，887 头；在 RPCF 中采集到水稻害虫 18 种，917 头，群落相似系数 0.86。2018 年在 RPOM 中采集到水稻害虫 13 种，1 226 头，在 RPCF 中采集到水稻害虫 15 种，2 035 头，群落相似系数 0.71。RPCF 的害虫个体数量显著高于 RPOM。2017 年在 RPOM 中采集到捕食性天敌 41 种，总个体数量 1 316 头，在 RPCF 中采集到捕食性天敌 31 种，总个体数量 989 头，群落相似性 0.83，Bray-Curtis 距离为 0.15。2018 年在 RPOM 稻田中采集到捕食性天敌 41 种，总个体数量 1 537 头，在 RPCF 稻田中采集到捕食性天敌 36 种，总个体数量 1 031 头，群落相似性 0.78，Bray-Curtis 距离为 0.31。连续 2 年捕食性天敌的物种丰富度为 RPOM 明显高于 RPCF，且在 2018 年差异极显著（$P<0.01$），个体数量 RPOM 显著高于 RPCF（$P<0.05$）。个体数量益害比值，2017 年 RPOM 为 1.86，RPCF 为 1.09，RPOM 明显高于 RPCF，但无显著差异（$P>0.05$）；2018 年 RPOM 为 1.64，RPCF 为 0.62，RPOM 显著高于 RPCF（$P<0.05$）。**【结论】** 复合微生物菌肥明显提高稻田土壤肥力；对捕食性天敌补偿猎物的个体数量没有明显影响；降低水稻害虫功能团的个体数量，显示了以土壤肥力为驱动的自下而上（Bottom-up）效应；显著提高捕食性天敌物种丰富度与个体数量，显著提高个体数量益害比，显示了自上而下（Top-down）效应。同时表明施用有机肥可预期捕食性天敌生态控害效能明显增强。

关键词 稻田；有机肥；节肢动物；Bottom-up 效应；Top-down 效应

Impacts of organic manure on rice paddy arthropod communities

YANG Fei** YANG He ZHAO Wen-Hua LIU Yu-Fang***

(College of Life Science, Hunan University of Science and Technology, Hunan Province Key Laboratory for Integrated Management of the Pests and Diseases on Horticultural Crops, Xiangtan 411201, China)

Abstract **[Objectives]** To investigate the effects of organic manure on rice paddy arthropod communities, including predators and rice pests, and determine whether this increases the abundance of important rice pests. **[Methods]** Single-season rice was planted for two consecutive years (2017-2018) in two kinds of rice paddy; one which used organic manure (RPOM) and another which used chemical fertilizer (RPCF). Soil fertility and the abundance of aquatic insects, spiders,

*资助项目 Supported projects：国家重点研发计划（2017YFD0200400）

**第一作者 First author，E-mail：yangf96@qq.com

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：yfliu2011@126.com

收稿日期 Received：2019-12-10；接受日期 Accepted：2019-12-31

predatory insects, functional rice pest groups, and the compensatory prey of predators in both field types were investigated, and predator-to-pest ratios for species richness and individual species abundance calculated. **[Results]** Alkali-hydrolyzable N, available P, total P and total K were significantly higher in the soil of the RPOM than in the RPCF (P<0.05). Total N and organic matter in the soil of the RPOM was also much higher than in RPCF (P<0.01). The number of aquatic insects in the RPCF was significantly lower than in the RPOM. There was no significant difference in the total number of Chironomus and Collembola between the RPOM and RPCF. In 2017, 887 rice insect pests belonging to 17 species were collected in the RPOM compared to 917 rice insect pests belonging to 18 species in the RPCF; a similarity coefficient of community of 0.86. In 2018, 1 226 rice pests belonging to 13 species, and 2 035 rice pests belonging to 15 species, were collected in the RPOM and RPCF, respectively. The similarity coefficient of community was 0.71 between the two paddy types. The number of individual rice insect pests was significantly higher in the RPCF than in the RPOM. In 2017, 1 316 predatory predators belonging to 41 species were collected in the RPOM compared to 989 belonging to 31 species were collected in the RPCF; a similarity coefficient of community of 0.83 and a Bray-Curtis distance of community of 0.151. In 2018, 1 537 predators belonging to 41 species were collected in the RPOM compared to 1 031 belonging to 36 species in the RPCF, with a similarity coefficient of community of 0.78 and a Bray-Curtis distance of community of 0.31. The diversity of predatory species in the RPOM was significantly higher than that in the RPCF in 2 consecutive years, a difference that was highly significant in 2018 (P<0.01). Furthermore, the number of individual insects in the RPOM was significantly higher than in the RPCF (P<0.05). The ratio of predatory species to insect pests in the RPOM and RPCF were 1.86 and 1.09 in 2017, and 1.64 and 0.64 in 2018, respectively, and was significantly higher in the RPOM than in the RPCF in 2018 (P<0.05). **[Conclusion]** Organic manure markedly improves the soil fertility of paddy fields, has no significant effect on the abundance of compensatory prey, and reduces the number of insect pests, which suggests a bottom-up effect. However, the species richness, abundance of predatory species, and the ratio of predatory species to insect pests, were significantly higher in fields with organic manure, suggesting a top-down effect. These results demonstrate that the addition of organic manure enhances the ecological control effect of the natural enemies of insect pests.

Key words paddy field; organic manure; arthropod community; bottom-up effect; top-down effect

自然界给了人类很多往往不能立刻察觉的信息，常只能对想了解的项目独立开展研究（Charles *et al.*，2004）。然而自然界中很少存在孤立的生物群落，不同的生物群落或功能团之间有广泛的营养联系，这种联系是实现有害生物控制的理论基础与物质基础，且对环境条件的改变一定会产生响应。具有最大潜能的生物防治是保护性生物防治（Kris *et al.*，2013），稻田节肢动物随着水稻的生长发育形成具有明显时间动态特征的生物群落，其中的捕食性天敌亚群落是控制水稻害虫的重要生防因子（刘雨芳，2019），常被作为稻田环境安全性评价的指示生物（刘雨芳，2016；2017；Maxime *et al.*，2017）。

不同施肥处理对稻田节肢动物群落结构均会产生影响，且不同肥料种类与不同氮磷钾组成比例对群落产生的影响不同，导致稻田节肢动物群落及其各功能团的组成结构和多样性存在差异（李志胜，2005）。绿肥通过自下而上（Bottom-up）和自上而下（Top-down）效应促进双季稻耕作系统中微食物网的发展，并且将微食物网的能量结构向以真菌为主的通道转移（Chen *et al.*，2019）。关于有机肥施用对土壤理化性质、土壤肥力的影响研究较多（吕真真等，2017；陈红金等，2019；马凡凡等，2019），但施用有机肥对稻田节肢动物群落可能产生何种自下而上或自上而下效应、对稻田捕食性天敌的生态效能影响等尚少有研究报道。

通过施用有机肥，根据生态位不同，采用不同采样方法，分别获得从稻田底泥、水体、水稻上的节肢动物，综合分析土壤肥力、补偿猎物与植食性害虫、地上捕食性节肢动物等的物种丰富度与数量关系，探讨稻田施用有机肥对稻田节肢动物的影响及捕食者的 Top-down 效应，为稻田中合理施用有机肥或控制化肥施用量提供依据。

1　材料与方法

1.1　研究地点与实验设计

实验点设在湖南省湘乡市东郊乡上花村（112°34′19″E，27°47′33″N）水稻种植区（刘雨芳，2019）。选择耕作年限、周围生境条件、土壤条件与水肥条件基本一致的两组稻田，每组 3 块地，每块地面积约 667 m^2。分别于 2017 与 2018 年的 5 月至 10 月，连续 2 年种植一季稻水稻。在其中一组稻田施用有机肥（Rice paddy field used organic manure，RPOM），另一组稻田按常规施用化肥（Rice paddy field used chemical fertilizer，RPCF）。两组稻田均不施用除草剂，采用人工除草，其他常规管理两组稻田相同。

1.2　肥料特征及施用方法

有机肥与化肥每季均施用 2 次，即移栽前施用 1 次基肥，中期施用 1 次追肥。有机肥为河北灵光生物科技有限公司生产的施能牌“根果旺”复合微生物菌肥，添加解淀粉芽胞杆菌、枯草芽胞杆菌，内含活菌数≥×10^8/g、有机质≥40%，氮磷钾 = 8%。施用量：基肥 3 000 kg/hm^2，追肥 600 kg/hm^2。化肥为湖南科隆肥业有限公司生产的湘珠牌复混肥作基肥（2017 年），总养分≥25%，内含尿素态氮，按 750 kg/hm^2 施用，或江西开门子股份有限公司生产的掺混复合肥作基肥（2018 年），总养分≥40%，按 375 kg/hm^2 施用。追肥均为灵谷化工有限公司生产的尿素，中颗粒，粒度为 1.18-3.35 mm，总氮含量≥46.4%，按 300 kg/hm^2 施用。

1.3　采样与分析方法

1.3.1　土壤采集与分析方法　在分类施肥实验前采集基础土壤样品，种植一季后再采集稻田土壤。按随机等量的原则，按 S 形线路，以不锈钢土钻钻取 0-20 cm 耕层混合土壤，每块地钻取 15 钻，各形成 3 个混合样，混合后风干、磨碎、过筛，用于土壤肥力与理化指标的测定。由湖南省农业科学院农化检测中心完成检测与计算。具体检测方法参照《土壤分析技术规范》（2006）标准，土壤 pH 值采用电位法、碱解氮采用碱解扩散法、有效磷采用盐酸-氟化铵提取-钼锑抗比色法、速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度法、全氮采用凯氏定氮法、全磷采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法、全钾采用碱熔-火焰光度法、有机质采用油浴加热重铬酸钾氧化-容量法测定。

1.3.2　水生昆虫采样与分类　样框法（水样+底泥样）混合采样（桂芳艳等，2015；刘雨芳等，2015），复式筛网法（上层 18 目，下层 60 目）流水洗出泥样，同一样框内上层的水样与下层的泥样合并为一混合样，用 85%乙醇浸泡 5 min 后保存于 80%的乙醇中，室内清样、分类、计数并鉴定到种或属，一些稀少且鉴定困难的蛹期水生昆虫种类鉴定到科。在冬春休耕后、翻田及分类施肥实验前采集 1 次，在分类施用肥料后的水稻分蘖期与孕穗期各采 1 次。

1.3.3　节肢动物采样方法　用吸虫器法配合样框法完成样品采集，采用对角线 5 点采样法随机采样 5 个。二年的水稻生长季均采样 4 次，分别在水稻分蘖期（约移栽后 3 周，7 月中旬）、孕穗期（8 月初）、花期（8 月中下旬）与成熟期（9 月下旬）各采样 1 次。将所得样品用 75%乙醇浸泡，完成清样、分类、鉴定，常见种类鉴定到种或属，稀少且鉴定困难的幼虫种类鉴定到科（刘雨芳等，2019）。

1.4　功能团与群落参数

1.4.1　功能团　本研究涉及水生昆虫、补偿猎物、捕食性天敌与植食性水稻害虫等功能团。水生昆虫指生活在稻田水中、水底、或表泥中的水生昆虫成虫、幼虫（或若虫）与蛹的集合。补偿猎物是指用吸虫器法获取的生活在稻田中，但不直接危害水稻的摇蚊成虫与弹尾虫的集合，其中摇蚊以摇蚊科的个体数量总和、弹尾虫以弹尾目的个体数量总和计算。稻田捕食性天敌功能团只涉及蜘蛛与捕食性昆虫集合，水稻害虫功能团指为害水稻的植食性昆虫集合（刘雨芳等，2019）。

1.4.2　群落参数　采用群落物种丰富度、个体数量、Shannon-Winner’s 多样性指数、均匀性指数、优势种、群落相似性与群落的 Bray-Curtis 距离

（丁岩钦，1994）等群落特征参数，比较分析 RPOM 与 RPCF 中水生昆虫、补偿猎物、捕食性天敌与植食性水稻害虫的物种组成、时间动态与结构特征。当某物种在功能团中的重要值 $IV_i \geq 0.1$ 时，确定为优势种种；当 $0.05 \leq IV_i < 0.1$ 时，为丰盛种；当 $0.01 \leq IV_i < 0.05$ 时，为常见种；$IV_i < 0.01$ 时，为稀有种（何云川等，2018；刘雨芳等，2019）。并将优势种天敌（害虫）与丰盛种天敌（害虫）合并称为重要天敌（害虫）。重要值 IV_i 的数学意义为第 i 个物种的个体数量（n_i）占群落或功能团中总个体数量（N）的比率，即 $IV_i = n_i/N$（刘雨芳等，2019）。

1.5 益害比

从物种（类）益害比（Spi）及个体数量益害比（Npi）两个维度比较可预期捕食性天敌的生态控害效能。其中 $Sp\text{i} = Sp/S_i$，$Np\text{i} = Np/N_i$，Sp 与 S_i 分别代表捕食性天敌与害虫的物种丰富度；Np 与 N_i 分别代表捕食性天敌与害虫的个体数量（刘雨芳等，2019）。

1.6 数据处理

采用 Excel 2010 进行数据汇总整理、计算与作图，其中总的捕食性天敌个体数量在作图时对数据进行对数转换，采用 SPSS 23.0 version 软件对试验数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 施用有机肥对稻田土壤理化性质与土壤肥力的影响

在分类施肥前检测实验田土壤基本理化性质为：pH 5.33，有机质 37.13 g/kg，全氮 2.23 g/kg，全磷 0.47 g/kg，全钾 13.73 g/kg，速效钾 87.67 mg/kg，有效磷 2.47 mg/kg，碱解氮 218.00 mg/kg，土壤偏酸性。经过一季二次分别施用有机肥与化肥后，RPOM 与 RPCF 土壤均有酸化趋势，RPOM 的 pH 4.94，RPCF 的 pH 5.02，土壤理化性质与肥力变化有明显差异。碱解氮、有效磷、全磷、全钾的含量 RPOM 显著高于 RPCF（$P<0.05$），全氮与有机质含量 RPOM 极显著高于 RPCF（$P<0.01$），速效钾含量 RPOM 略高于 RPCF（$P>0.05$），RPOM 与 RPCF 土壤中含量均降低的元素有碱解氮与速效钾，特别是速效钾降低程度特别显著，RPCF 土壤中全钾含量也降低（表 1）。

2.2 RPOM 与 RPCF 水生昆虫多样性比较

在分类施肥实验前的本底调查表明，水田中保存着较丰富的水生昆虫物种与个体数量，共采到 18 种水生昆虫，其中双翅目昆虫 11 种，半翅目昆虫 4 种，鞘翅目昆虫 3 种。1 个单位体积里的个体数量 283.67 头，摇蚊是重要的优势类群，占个体数量的 95.42%，摇蚊 *Radotanypus*

表 1 RPOM 与 RPCF 土壤理化性质与肥力变化比较
Table 1 Comparison of soil fertility between RPOM and RPCF

元素 Element	RPOM		RPCF		$P_{\text{RPOM-RPCF}}$
	Mean±SE	Change value	Mean±SE	Change value	
碱解氮（mg/kg）Alkali-hydrolyzable N	216.33±1.76	- 1.67	203.33±0.88	- 14.67	0.039
有效磷（mg/kg）Available P	4.43±0.03	1.96	3.77±0.09	1.30	0.010
速效钾（mg/kg）Quick-acting K	51.33±0.33	- 36.34	49.00±1.00	- 38.67	0.192
全氮（g/kg）Total N	2.45±0.01	0.22	2.27±0.01	0.04	0.007
全磷（g/kg）Total P	0.50±0.00	0.03	0.47±0.00	0.00	0.035
全钾（g/kg）Total K	13.83±0.03	0.10	13.40±0.10	- 0.33	0.039
有机质（g/kg）Organic matter	48.53±0.33	11.40	38.93±0.38	1.80	0.000

RPOM：施有机肥的稻田；RPCF：施化肥的稻田。$P_{\text{RPOM-RPCF}}$：RPOM 与 RPCF 比较的 P 值。下表同。

RPOM: Rice paddy field used organic manure; RPCF: Rice paddy field used chemical fertilizer. $P_{\text{RPOM-RPCF}}$: P value of comparison between RPOM and RPCF. The same below.

paremaculipennis 为绝对优势种，占群落总重要值的 0.83。经过翻耕施肥，水稻移栽至分蘖期、孕穗期的连续 2 年的调查结果表明，与翻耕前比较，稻田水生昆虫的物种数量、个体数量均显著下降，RPCF 的个体数量下降比 RPOM 更加明显（表 2）。

2.3　RPOM 与 RPCF 补偿猎物的比较

在 2017 年水稻各生长期，摇蚊与弹尾虫的个体数量为 RPOM 略高于或略低于 RPCF，但均无显著差异（P>0.05）；在 2018 年的分蘖期 RPOM 的摇蚊与弹尾虫均显著高于 RPCF（P<0.05），成熟期 RPOM 的摇蚊个体数量显著低于 RPCF RPCF（P<0.05），其余各生长期期的摇蚊与弹尾虫的个体数量为 RPOM 略高于或略低于 RPCF，但均无显著差异（P>0.05）（表 3）。综合分析连续 2 年的补偿猎物个体数量总体情况，RPOM 与 RPCF 没有显著差异（P>0.05）（图 1）。

2.4　RPOM 与 RPCF 稻田水稻害虫功能团发生风险比较

2017 年在 RPOM 中采集到水稻害虫 17 种，

表 2　RPOM 与 RPCF 水生昆虫多样性比较

Table 2　Comparison of diversity of aquatic insects between RPOM and RPCF

年份 Year	稻田 Rice field	物种丰富度 Species richness		个体数量 Individual number		多样性指数 Diversity index	
		分蘖期 Tillering stage	孕穗期 Booting stage	分蘖期 Tillering stage	孕穗期 Booting stage	分蘖期 Tillering stage	孕穗期 Booting stage
2017	RPOM	5	4	16.40±2.69	6.00±1.05	0.513	0.865
	RPCF	4	5	6.00±2.70	3.40±1.40	0.778	1.313
2018	RPOM	7	7	4.80±0.80	13.80±5.45	1.816	1.142
	RPCF	7	4	18.80±2.49	5.80±2.59	1.097	1.177

个体数量计量体积为 1 个混合采样体积，水体与泥体各为 3 125 cm^3

The measurement volume of individual quantity was 1 mixed sampling volume, incluing water and mud sample 3 125 cm^3 each.

表 3　RPOM 与 RPCF 稻田天敌补偿猎物的数量时间动态

Table 3　Temporal dynamics of compensatory prey number of predatory natural enemies in RPOM and RPCF

补偿猎物 Compensatory prey	年份 Year	稻田 Rice field	水稻发育期 Developmental stage of rice			
			分蘖期 Tillering stage	孕穗期 Booting stage	花期 Flowering stage	成熟期 Maturation stage
摇蚊科 Chironomidae	2017	RPOM	11.4±1.57	84.6±3.08	22.2±1.00	10.2±0.61
		RPCF	27.0±2.15	83.8±4.90	21.2±2.25	10.2±0.79
		$P_{RPOM-RPCF}$	0.084	0.938	0.745	1.000
	2018	RPOM	34.4±6.23	13.8±6.62	41.4±4.99	9.6±1.54
		RPCF	18.6±3.39	27.0±2.68	40.6±8.64	16.2±1.96
		$P_{RPOM-RPCF}$	0.015	0.173	0.937	0.034
弹尾目 Collembola	2017	RPOM	5.2±0.47	4.8±0.47	3.0±0.36	14.8±1.18
		RPCF	7.6±0.86	6.0±0.18	2.2±0.14	12.4±0.93
		$P_{RPOM-RPCF}$	0.275	0.109	0.099	0.374
	2018	RPOM	4.8±0.66	1.2±0.80	7.4±2.80	25.8±2.06
		RPCF	2.4±0.51	1.4±0.60	5.8±0.86	34.40±16.65
		$P_{RPOM-RPCF}$	0.033	0.854	0.587	0.659

计量面积均为 1 m^2。表 5 同。The measured area is 1 m^2. The same as table 5.

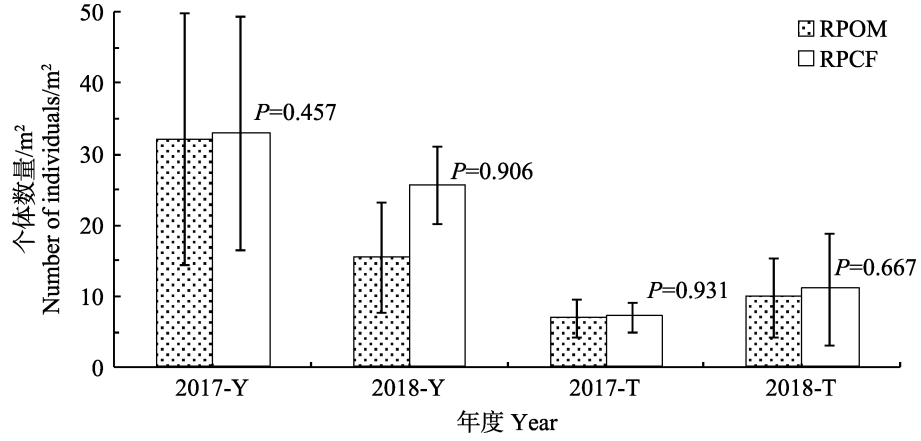

图 1　2017 年与 2018 年 RPOM 与 RPCF 稻田中摇蚊与弹尾虫的个体数量比较
Fig. 1　Comparison of individual number of Chironomidae and Collembola between RPOM and RPCF in 2017 and 2018

2017-Y 与 2018-Y 分别表示 2017 与 2018 年的摇蚊，2017-T 与 2018-T 分别表示 2017 与 2018 年的弹尾虫。
RPOM: 施有机肥的稻田；RPCF: 施化肥的稻田。
2017-Y and 2018-Y mean Chironomidae in 2017 and 2018 respectively; 2017-T and 2018-T mean Collembola in 2017 and 2018, respectively. RPOM: Rice paddy field used organic manure; RPCF: Rice paddy field used chemical fertilizer.

887 头，单位面积里的个体数量为（44.34±11.84）头，多样性指数 2.268 8；在 RPCF 中采集到水稻害虫 18 种，917 头，单位面积里的个体数量为（45.85±9.62）头，多样性指数 2.186 3；两类稻田中共采集到水稻害虫 20 种，共有物种 15 个，相似系数 0.86。害虫的物种丰富度与单位面积里的个体数量为 RPOM 低于 RPCF，但没有显著差异。2018 年在 RPOM 中采集到水稻害虫 13 种，1 226 头，单位面积里的个体数量为（61.30±30.65）头，多样性指数 1.693 0；在 RPCF 中采集到水稻害虫 15 种，2 035 头，单位面积里的个体数量为（101.75±55.29）头，多样性指数 1.584 0；两类稻田中共采集到水稻害虫 19 种，共有物种 10 个，相似系数 0.71。物种丰富度为 RPOM 少于 RPCF，没有明显差异，但 RPCF 的害虫个体数量是 RPOM 的 1.66 倍，即 RPCF 的害虫个体数量显著高于 RPOM。

RPOM 与 RPCF 中害虫物种丰富度均较高，但群落重要值 P_i ≥0.1 的优势种不多，且其优势性害虫明显，即实际产生为害的害虫种类不多。2017 年 RPOM 有优势害虫 4 种：褐飞虱 *Nilaparvata lugens*、电光叶蝉 *Inazuma dorsalis*、白背飞虱 *Sogatella furcifera* 与中华稻缘蝽 *Leptocoris chinensis*；没有丰盛种；稻水象甲 *Lissorhoptrus oryzophilus*、蚜虫、稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis*、黑腹蝽 *Stollia ventralis*、蓟马 5 种(类)植食性昆虫，其重要值处于 0.01≤P_i < 0.05 区间内，成为 RPOM 的常见害虫种。RPCF 有优势害虫 3 种：褐飞虱 *Nilaparvata lugens*、白背飞虱与电光叶蝉 *Inazuma dorsalis*，群落重要值 P_i 为处于 0.05≤P_i < 0.1 区间的害虫丰盛种有 2 种：中华稻缘蝽与稻水象甲（图 3：A）；蓟马、蚜虫、稻纵卷叶螟、黑腹蝽、黑唇斑叶蝉与细毛蝽 6 种植食性昆虫，其重要值处于 0.01≤P_i < 0.05 区间内，成为 RPCF 的常见害虫种。2018 年 RPOM 中有 4 种优势害虫，分别是褐飞虱、电光叶蝉、黑尾叶蝉 *Nephotettix cincticeps* 与蓟马；没有丰盛种害虫，有 3 个常见种害虫，分别是仅白背飞虱，稻象甲与稻纵卷叶螟，其重要值处于 0.01≤P_i < 0.05 区间内，其中白背飞虱 P_i = 0.049，接近 0.05；在 RPCF 中采到 3 种优势害虫，分别是褐飞虱、电光叶蝉与黑尾叶蝉，重要值位于 0.05≤P_i < 0.1 区间的丰盛种害虫有 2 种：蓟马与白背飞虱（图 3：B），有 1 个常见种害虫，稻纵卷叶螟。2017 与 2018 年 RPOM 与 RPCF 稻田中主要害虫(优势种+丰盛种)的物种组成与总数量结构比较见图 2。

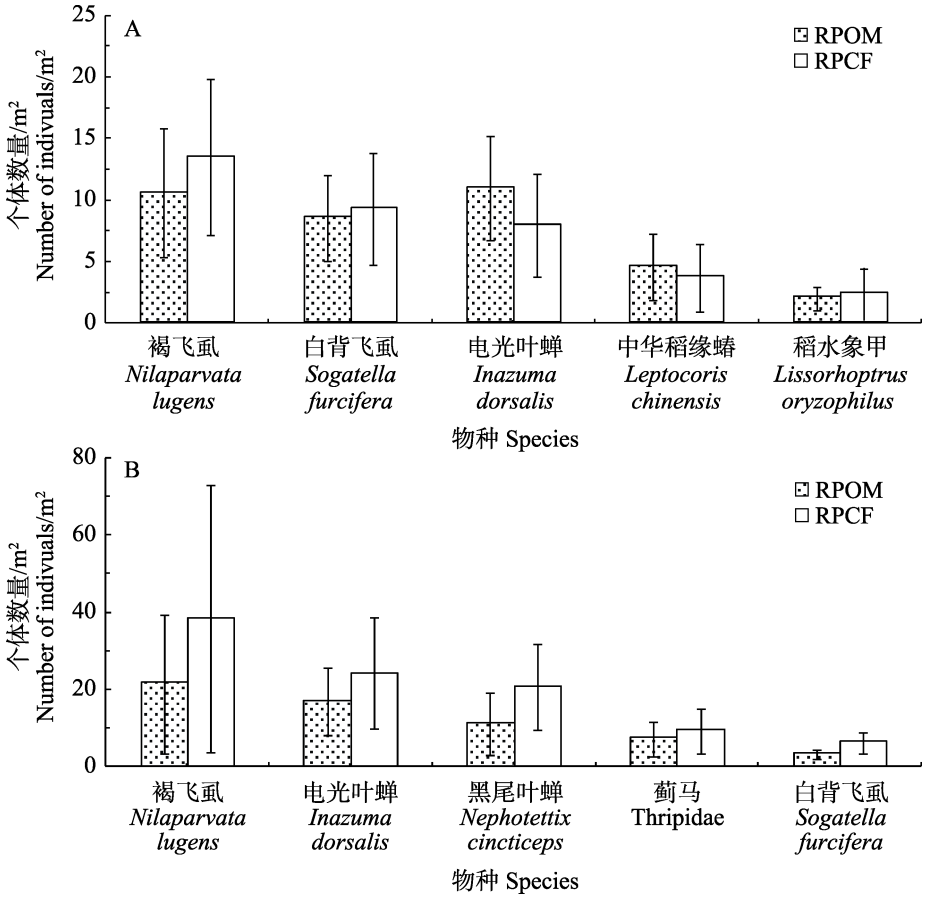

图 2　2017（A）与 2018（B）年 RPOM 与 RPCF 主要害虫组成与数量比较
Fig. 2　Comparison of the compose and individual number of important insect pests between RPOM and RPCF in 2017(A) and 2018(B)

2.5　RPOM 与 RPCF 稻田捕食者功能团比较

2.5.1　捕食者功能团总体分析比较　分别对 2017 年与 2018 年水稻 4 个生长发育期分次采样所得数据进行总体分析，得到如下结果：2017 年在 RPOM 稻田中采集到捕食性天敌 41 种，总个体数量 1 316 头，多样性指数 2.163 1，均匀性指数 0.702 4；在 RPCF 稻田中采集到捕食性天敌 31 种，总个体数量 989 头，多样性指数 2.097 8，均匀性指数 0.740 8；RPOM 与 RPCF 稻田捕食性天敌的群落相似性 0.833 3，Bray-Curtis 距离为 0.151。2018 年在 RPOM 稻田中采集到捕食性天敌 41 种，总个体数量 1 537 头，多样性指数 1.922 6，均匀性指数 0.622 8；在 RPCF 稻田中采集到捕食性天敌 36 种，总个体数量 1 031 头，多样性指数 1.964 4，均匀性指数 0.670 9；RPOM 与 RPCF 稻田捕食性天敌的群落相似性 0.779 2，Bray-Curtis 距离为 0.311。连续 2 年整个生长季各期的总体平均值显示，捕食性天敌的物种丰富度与个体数量，RPOM 均明显高于 RPCF，这种差异在 2018 年的物种丰富度达极显著（P<0.01），2017 年与 2018 年的个体数量差异均显著（P<0.05）（表 4）。

2.5.2　捕食者功能团特征参数时间动态分析比较　RPOM 与 RPCF 捕食性天敌功能团的物种丰富度、个体数量、多样性指数、均匀性指数、群落相似性、Bray-Curtis 距离的时间动态如表 5 所示。单位样方面积内获得的物种丰富度，除 2018 年的水稻孕穗期与成熟期为 RPOM 略低于 RPCF，但没有显著差异（P>0.05）外，连续 2 年其余各生长期比较，均为 RPOM 明显高于 RPCF，且在 2018 年的分蘖期达到极显著差异（P<0.01）。捕食性天敌功能团在单位样方面积内的个体数量，均为 RPOM 明显高于 RPCF，虽

表 4 RPOM 与 RPCF 捕食性天敌功能团的群落特征参数总体比较

Table 4 Comparison of the characteristic parameters of the predatory natural enemies between RPOM and RPCF

年份 Year	稻田 Rice paddy	物种丰富度 Species richness	个体数量 Number of individuals	多样性指数 Diversity index	均匀性指数 Eveness index	群落相似性 Community similarity	Bray-Curtis 距离 Bray-Curtis distance
2017	RPOM	21.75±0.85	329.00±44.25	2.163 1±0.14	0.702 7±0.04	0.833	0.151
	RPCF	17.00±0.71	247.25±62.39	2.097 8±0.22	0.740 8±0.08		
	$P_{RPOM-RPCF}$	0.008	0.025	0.617	0.468		
2018	RPOM	22.00±0.71	384.25±123.04	1.922 6±0.11	0.622 8±0.04	0.779	0.311
	RPCF	19.75±2.81	257.75±108.11	1.964 4±0.05	0.670 9±0.04		
	$P_{RPOM-RPCF}$	0.398	0.017	0.640	0.038		

物种丰富度与个体数量为全年 4 次采样的平均值，每次 5 m^2。

Species richness and the number of individuals are the average of four sampling times a year, 5 m^2 each time.

表 5 RPOM 与 RPCF 捕食性天敌功能团特征参数的时间动态比较

Table 5 Comparison of temporal dynamics of the characteristic parameters of the predatory natural enemies between RPOM and RPCF

参数 Parameters	年份 Year	稻田 Rice paddy	水稻发育期 Developmental stage of rice			
			分蘖期 Tillering stage	孕穗期 Booting stage	花期 Flowering stage	成熟期 Maturity stage
物种丰富度 Species richness	2017	RPOM	14.8±0.82	14.8±0.47	12.2±0.64	16.6±0.21
		RPCF	13.0±0.36	13.2±0.64	9.0±0.36	14.6±0.93
		$P_{RPOM-RPCF}$	0.167	0.160	0.056	0.142
	2018	RPOM	13.0±0.95	11.2±1.39	12.0±1.05	13.8±1.02
		RPCF	7.4±0.87	12.4±0.93	9.0±0.63	14.0±1.34
		$P_{RPOM-RPCF}$	0.006	0.603	0.070	0.838
个体数量 Number of individuals	2017	RPOM	90.0±9.30	54.6±2.65	50.8±6.90	67.8±3.65
		RPCF	82.6±8.44	38.4±4.87	24.2±3.11	52.6±3.43
		$P_{RPOM-RPCF}$	0.700	0.128	1.063	0.097
	2018	RPOM	44.8±7.86	54.4±4.72	58.0±11.95	150.2±23.69
		RPCF	17.6±3.76	43.8±3.53	30.4±4.02	114.4±18.73
		$P_{RPOM-RPCF}$	0.056	0.052	0.083	0.343
多样性指数 Diversity index	2017	RPOM	1.733 9	2.168 8	2.284 2	2.425 4
		RPCF	1.456 2	2.403 7	2.146 8	2.384 3
	2018	RPOM	2.132 8	1.942 9	1.937 7	1.646 8
		RPCF	1.975 0	2.072 5	1.989 6	1.820 3
均匀性指数 Eveness index	2017	RPOM	0.592 1	0.682 4	0.750 3	0.784 7
		RPCF	0.503 8	0.831 6	0.792 8	0.824 9
	2018	RPOM	0.690 0	0.619 6	0.646 8	0.525 2
		RPCF	0.729 3	0.661 0	0.734 7	0.558 7
群落相似性 Similarity	2017	RPOM- RPCF	0.789 5	0.857 1	0.666 7	0.800 0
	2018	RPOM- RPCF	0.702 7	0.565 2	0.648 6	0.816 3
Bray-Curtis 距离 Bray-Curtis distance	2017	RPOM- RPCF	0.105 4	0.273 1	0.402 7	0.174 5
	2018	RPOM- RPCF	0.471 7	0.715 4	0.348 4	0.142 9

差异不显著（P>0.05），均未获得统计学意义上的支持，但个体数量的这种差异不容忽视。

2.5.3　重要蜘蛛种类及其时间动态比较　2017 年 RPOM 与 RPCF 的重要蜘蛛种类（优势种蜘蛛+丰盛种蜘蛛）在个体数量上与物种组成结构为：均各有 2 个优势种蜘蛛与 2 个丰盛种蜘蛛，优势种均为食虫沟瘤蛛 *Pirata subpiraticus* 与纵条蝇狮 *Marpiss magister*，丰盛种均为八斑鞘蛛 *Coleosoma octomaculatum* 与拟水狼蛛 *Pirata subpiraticus*。其中在水稻生长发育各期均为优势种，全生育期为绝对优势种的只有食虫沟瘤蛛 1 种；纵条蝇狮为花期与成熟期的优势种，全生育期亦为优势种；八斑鞘蛛在分蘖期与孕穗期为优势种，但在花期与成熟期个体数量偏低，全生育期仅为丰盛种；拟水狼蛛在花期为优势种，但在分蘖期与孕穗期个体数量偏低或仅接近丰盛种，成熟期的重要值接近为优势种，全生育期仅为丰盛种。2017 年 RPOM 与 RPCF 的重要蜘蛛种类所占的重要值分别为 68.48 与 66.19。2018 年 RPOM 与 RPCF 均有 4 种重要蜘蛛种类，其中 3 个优势种蜘蛛与 1 个丰盛种蜘蛛，优势种均为食虫沟瘤蛛、八斑鞘蛛与拟水狼蛛，丰盛种均为肖蛸 *Tetragnatha* sp.。食虫沟瘤蛛在各个生长期均为中，且其优势性非常突出。2018 年 RPOM 与 RPCF 的重要蜘蛛种类所占的重要值分别为 87.48 与 83.31。从连续 2 年重要蜘蛛的物种组成结构、个体数量与重要值的时间动态与总体分析显示，RPOM 与 RPCF 没有显著差异（表 6）。

2.5.4　优势种捕食性昆虫比较　本研究中采到的稻田捕食性昆虫功能团主要由鞘翅目的隐翅

表 6　RPOM 与 RPCF 重要蜘蛛种类组成、个体数量与重要值的时间动态及总体比较

Table 6　Comparison of temporal dynamics and whole stage of the compose, individual number and important value of important spiders between RPOM and RPCF

年份 Year	物种 Species	级别* Grade	稻田 Rice paddy	分蘖期 Tillering stage	孕穗期 Booting stage	花期 Flowering stage	成熟期 Maturity stage	全生育期 Whole developmental stage
2017	食虫沟瘤蛛	DS	RPOM	50.80/59.21	24.40/50.21	12.40/25.94	20.00/34.13	26.90/41.07
	Ummeliata insecticeps	DS	RPCF	54.20/67.58	11.00/31.98	5.40/23.08	12.20/25.10	20.70/41.84
	纵条蝇狮	DS	RPOM	3.20/3.73	2.60/5.35	12.00/25.10	9.60/16.38	6.85/10.46
	Marpiss magister	DS	RPCF	1.60/2.00	4.20/12.21	5.80/24.79	9.80/20.16	5.35/10.81
	八班鞘蛛	AS	RPOM	10.00/11.66	6.00/12.35	2.60/5.44	2.20/3.75	5.20/7.94
	Coleosoma octomaculatum	AS	RPCF	8.20/10.22	3.80/11.05	0.20/0.85	1.60/3.29	3.45/6.97
	拟水狼蛛	AS	RPOM	4.80/5.59	1.80/3.70	10.00/20.91	7.00/11.95	5.90/9.01
	Pirata subpiraticus	AS	RPCF	2.40/2.99	2.00/5.81	3.80/16.24	4.80/9.88	3.25/6.57
2018	食虫沟瘤蛛	DS	RPOM	16.60/49.11	25.80/51.39	20.40/39.53	75.60/53.09	34.60/50.10
	Ummeliata insecticeps	DS	RPCF	7.20/48.65	1.80/4.52	9.40/35.34	53.40/48.90	17.95/44.38
	八班鞘蛛	DS	RPOM	1.25/2.96	0.60/1.20	18.00/34.88	33.60/23.60	13.36/19.35
	Coleosoma octomaculatum	DS	RPCF	0.40/2.70	19.20/48.24	8.40/31.58	26.80/24.54	7.00/17.31
	拟水狼蛛	DS	RPOM	6.20/18.34	6.60/13.15	6.00/11.63	17.00/11.94	8.23/12.96
	Pirata subpiraticus	DS	RPCF	4.00/27.03	2.20/5.53	2.80/10.53	10.20/9.34	4.80/11.87
	肖蛸	AS	RPOM	3.20/9.47	5.40/10.76	2.20/4.26	3.20/2.25	3.50/5.07
	Tetragnatha sp.	AS	RPCF	1.60/10.81	7.80/19.60	1.80/6.77	4.60/4.21	3.95/9.77

DS：优势种 Dominant species，AS：丰盛种 Abundant species；/的左上方为 1 m^2 的个体数量，/的右下方为重要值。The upper left of the / is the individual number of 1 square meter, and the lower right of the / is the important value of species.

虫类、瓢虫类、步甲类，半翅目的宽黾蝽类、猎蝽与盲蝽类及双翅目种类组成，从组成结构及个体数量上分析，远低于蜘蛛。2017 年在 RPOM 与 RPCF 共获得 4 种优势种捕食性昆虫：青翅蚁形隐翅虫 *Paederus fuscipes*、黑肩绿盲蝽 *Cyrtorhinus lividipennis*、大蚤蝇 *Megaselia* sp.与尖钩宽黾蝽 *Microvelia horvathi*，其中前 3 种为共同优势种，尖钩宽黾蝽仅为 RPOM 的优势种。2018 年在 RPOM 与 RPCF 也共获得 4 种优势种捕食性昆虫，且优势种捕食性昆虫的物种组成与 2017 年完全相同，是青翅蚁形隐翅虫、大蚤蝇、尖钩宽黾蝽与黑肩绿盲蝽，其中前 3 种为共同优势种，黑肩绿盲蝽仅为 RPCF 的优势种，在 RPOM 为丰盛种。单位面积内的优势种个体数量均为 RPOM 明显高于 RPCF（图 3）。从共有优势种的重要值分析，则表现为 RPCF 略高于或略低于 RPOM，但无显著差异（图 4）。

2.6 稻田捕食者的生态功能效能响应

本文从物种丰富度益害比与个体数量益害比 2 个维度比较 RPOM 与 RPCF 天敌昆虫控制水稻害虫的生态功能实现程度的强弱。

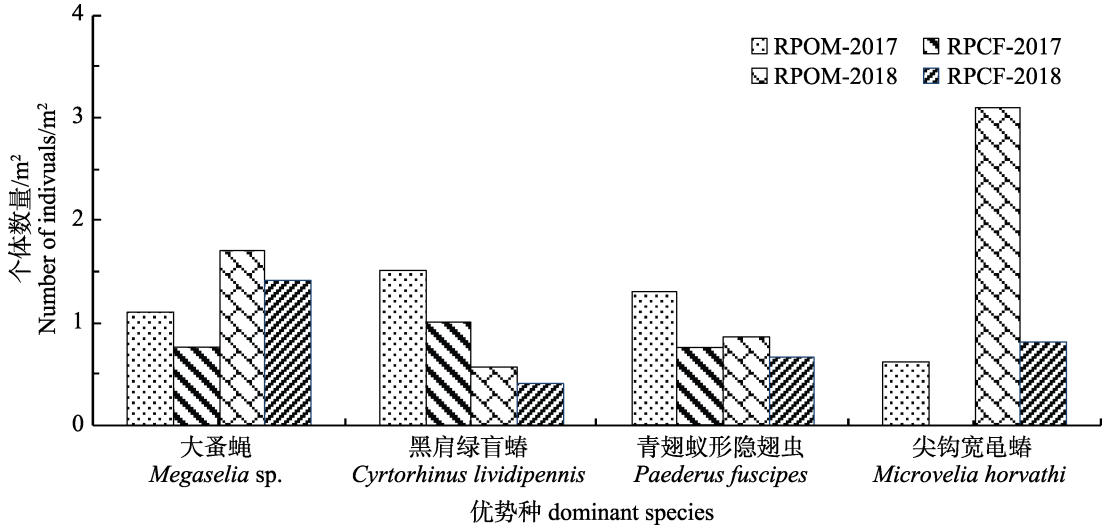

图 3 RPOM 与 RPCF 优势种捕食性昆虫的个体数量比较

Fig. 3 Comparison of the individual number of dominant predatory insect between RPOM and RPCF

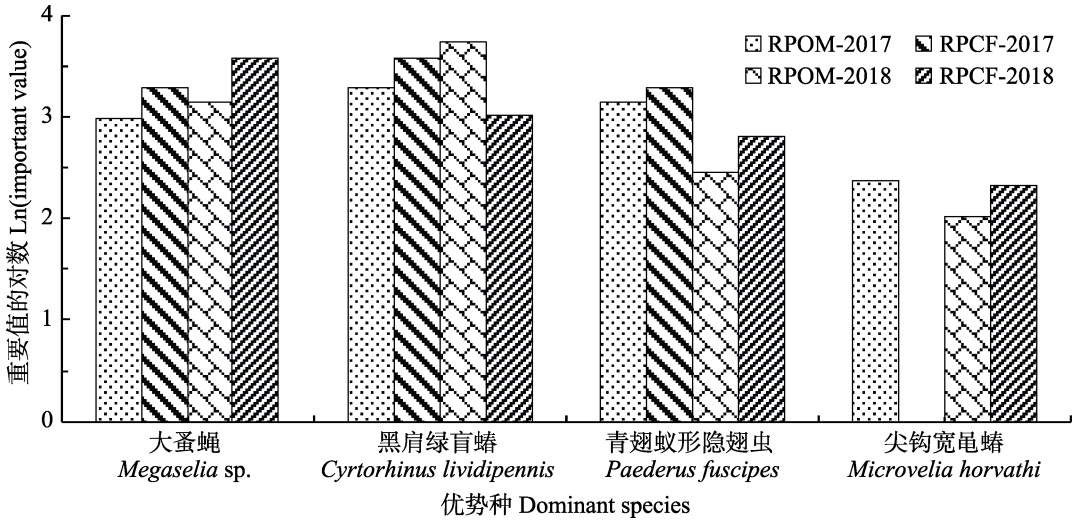

图 4 RPOM 与 RPCF 优势种捕食性昆虫的重要值比较

Fig. 4 Comparison of the important value of dominant predatory insect between RPOM and RPCF

2017 年与 2018 年 2 年水稻生长全期的物种丰富度益害比 *Sp*i，表现趋势一致，除孕穗期为 RPOM 低于 RPCF 外，其余各生长期与全期均表现为 RPOM 明显高于 RPCF（表 7），但总体无显著差异，2017 年的 $P = 0.744$，2018 年的 $P = 0.251$。

总个体数量益害比 *Np*i 值，2017 年分别为：$Npi_{RPOM} = 1.86$，$Npi_{RPCF} = 1.09$，RPOM 明显高于 RPCF，但无显著差异（$P>0.05$）；2018 年分别为：$Npi_{RPOM} = 1.64$，$Npi_{RPCF} = 0.62$，RPOM 显著高于 RPCF（$P<0.05$）。对各生长期的 *Np*i 比较分析表明，2017 年的水稻各生长期，*Np*i 均为 RPOM 高于 RPCF，但均未达到统计学意义上的不同，差异不显著（$P>0.05$），且在开花期与成熟期差异显著（$P<0.05$）（图 5：A）。2018 年的水稻各生长期，*Np*i 均为 RPOM 明显高于 RPCF，且在

表 7　RPOM 与 RPCF 各生长期与全期的物种丰富度益害比

Table 7　Species richness ratio of predatory natural enemy to insect pests both total period and every growth stage in RPOM and RPCF

年份 Year	生境 Habitat	分蘖期 Tillering stage	孕穗期 Booting stage	花期 Flowering stage	成熟期 Maturation stage	全期 Whole period
2017	RPOM	2.22	1.85	2.10	1.47	2.41
	RPCF	1.89	2.57	1.36	1.38	1.72
	RPOM/RPCF	1.18	0.72	1.54	1.06	1.40
2018	RPOM	3.14	2.30	2.50	2.30	3.15
	RPCF	1.67	2.56	1.67	2.17	2.40
	RPOM/RPCF	1.89	0.90	1.50	1.06	1.31

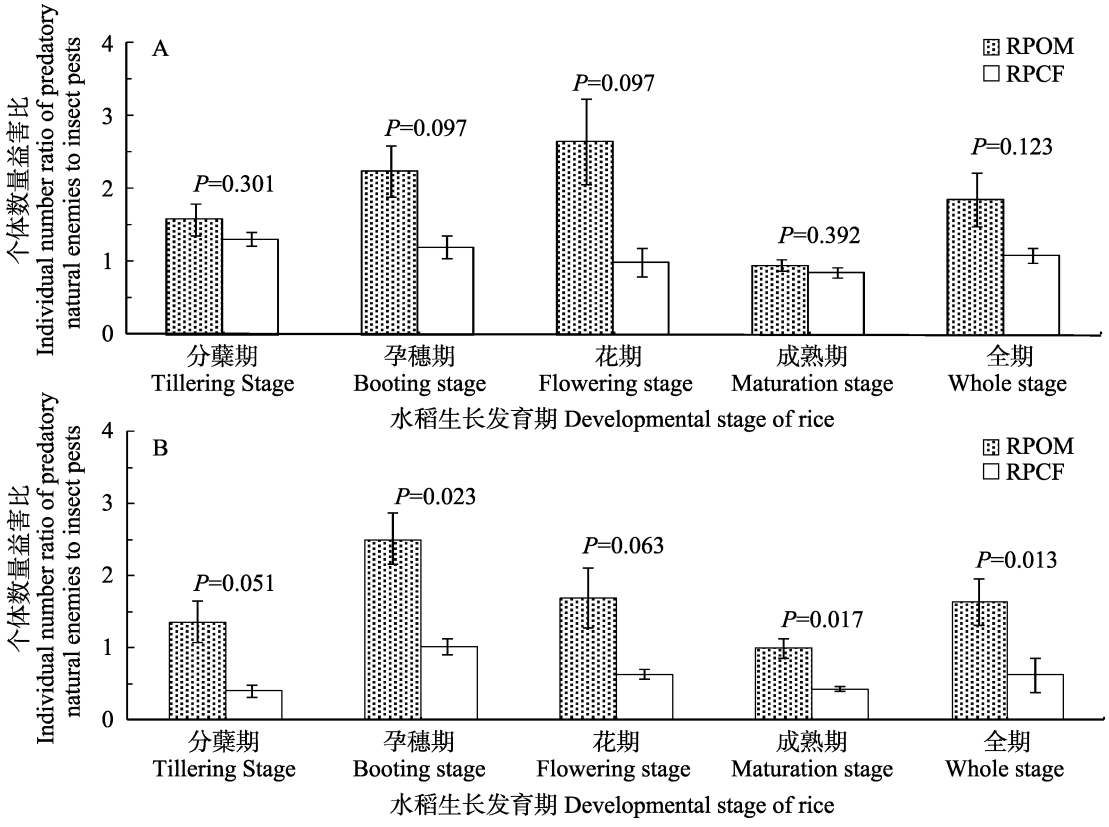

图 5　2017（A）与 2018（B）RPOM 与 RPCF 个体数量益害比的总体与时间动态

Fig. 5　Temporal dynamics and whole period of the individual number ratio of predatory natural enemies to insect pest in RPOM and RPCF in 2017 (A) and 2018 (B)

孕穗期与成熟期呈现显著差异（$P<0.05$），在分蘖期差异接近显著水平，P 值非常接近 0.05（图 5：B）。说明与 RPCF 比较，RPOM 有更好的捕食性天敌控制水稻害虫的物质基础，可预期 RPOM 可实现的生态控害效能的程度明显强于 RPCF。

3 讨论

使用施能牌“根果旺”复合微生物菌肥，明显提高稻田土壤肥力；对天敌补偿猎物（稻田摇蚊与弹尾虫）的个体数量总体没有明显影响；对水稻害虫发生的种类、优势种没有明显影响，但能降低水稻害虫功能团的个体数量，显示了 Bottom-up 效应；显著或极显著提高捕食性天敌物种丰富度与个体数量，对物种益害比没有明显影响，但显著提高个体数量益害比，显示了 Top-down 效应。表明施用有机肥有利于涵养更多的捕食性天敌，减轻水稻害虫的为害，有更好的捕食性天敌控制水稻害虫的物质基础，可预期生态控害效能的实现程度明显增强。

施用有机肥，能有效提高稻田土壤有机质、全氮、有效磷和速效钾含量，对土壤养分的提升具有长期、持续性效果（陈红金等，2019），配施有机肥能有效提高土壤肥力（吕真真等，2017），有机肥替代化肥处理后，土壤有机质、全氮、有效磷和速效钾含量高于单施化肥土壤（马凡凡等，2019）。这与本研究中施用有机肥较施用化肥明显增加稻田土壤有机质、碱解氮、有效磷、全氮、全钾含量等的研究结果一致。稻田中应用紫云英绿肥，增加了土壤的有机碳含量，提高了微生物的生物量和原生动物的丰度，未改变线虫的丰度，显示了底物驱动的自下而上效应；增加了杂食性捕食者的丰度以及杂食性捕食者与线虫的丰度比率，这表明自上而下的效应（Chen *et al.*，2019），也与本研究中施用有机肥没有改变节肢动物群体总体的物种丰富度、但降低害虫发生程度、提高个体数量益害比、增加天敌控害生态效能的结果具有一致性。

稻田被翻耕后，在 RPOM 与 RPCF 中的水生昆虫的种类与个体数量均呈现锐减，因为不论是物种丰富度还是个体数量均很低，两种处理的比较不一定能反映其实际影响，这种“锐减”可能主要是耕田机翻耕与平田的“毁灭性伤害”引起，或至少也是重要的影响因子之一；可通过翻耕平整稻田后再分别作施肥处理，避免机械影响再作肥料处理，可进一步探讨施用有机肥是否影响稻田水生昆虫功能团。与基础值比较，两类施肥的稻田土壤中速效钾含量降低明显，在有机肥的研制中适当加大钾肥的比例，在化肥施用中适当补充钾肥，以保持土壤养分的均衡、长期与持续性效果。

致谢：湖州师范学院生命科学学院汪兴中博士鉴定水生昆虫物种，中山大学生命科学学院贾凤龙博士鉴定部分半翅目与鞘翅目昆虫物种，一并致谢。

参考文献 (References)

Charles EC, Howard EE, Steven Y, 2004. Visual attention: Bottom-up versus top-down. *Current Biology*, 14(19): R850–R852.

Chen HJ, Zhang RL, Wu CY, 2019. Effect of long-term application of organic fertilizer on improvement and fertilizer cultivation of paddy field. *Zhejiang Agricultural Science*, 60(8): 1356–1359. [陈红金, 章日亮, 吴春艳, 2019. 长期施用有机肥对稻田的改良培肥效应. 浙江农业科学, 60(8): 1356–1359.]

Chen YF, Hu N, Zhang QZ, Lou YL, Li ZF, Tang Z, Yakov K, Wang YD, 2019. Impacts of green manure amendment on detritus micro-food web in a double-rice cropping system. *Applied Soil Ecology*, 138: 32–36.

Ding YQ, 1994. Insect Mathematic Ecology. Bejing: Science Press. 431–457. [丁岩钦, 1994. 昆虫数学生态学.北京: 科学出版社. 431–457.]

Gui FY, Liu YF, Mo SY, Sun LC, Liu WH, Ge F, 2015. Ecological safety of transgenic Cry1Ab/Ac rice on zoobenthoscommunity in paddy fields. *Journal of Plant Protection*, 42(5): 715–723. [桂芳艳, 刘雨芳, 莫书银, 孙丽川, 刘文海, 戈峰, 2015. 转 Cry1Ab/Ac 基因水稻对稻田底栖动物群落的生态安全性. 植物保护学报, 42(5): 715–723.]

He YC, Yang GJ, Wang XP, 2018. Diversity and stability of terrestrial insect community in different wetlands in Yinchuan, Ningxia, Northwest China. *Acta Entomol. Sin.*, 61(12): 1439–1452. [何云川, 杨贵军, 王新谱, 2018. 银川不同湿地陆生昆虫群落多样性与稳定性. 昆虫学报, 61(12): 1439–1452.]

Kris AGW, Lu YH, Helda M, Luis L, Jesusa CL, Panagiotis AE, Luis MH, 2013. Current status and potential of conservation biological control for agriculture in the developing world. *Biological Control*, 65(1): 152–167.

Li ZS, 2005. Effects of the fertilization application on the arthropod community in rice field. Master dissertation. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University. [李志胜, 2005. 施肥对稻田节肢动物群落的影响. 硕士学位论文. 福州: 福建农林大学.]

Liu YF, 2016. Bibliometric review of international research on insect-resistant transgenic Bt rice. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 53(3): 648–659. [刘雨芳, 2016. 基于 WOS 文献计量的转 Bt 基因抗虫水稻研究国际动态分析. 应用昆虫学报, 53(3): 648–659.]

Liu YF, 2017. A bibliometric analysis of Chinese entomology based on WOS and CSCD between 2011 and 2016. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 54(6): 898–908. [刘雨芳, 2017. 基于 WOS 与 CSCD 文献计量的中国昆虫学研究透视(2011-2016). 应用昆虫学报, 54(6): 898–908.]

Liu YF, 2019. A review of the diversity and ecological function of paddy field insect communities in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(2): 183–194. [刘雨芳, 2019. 中国稻田昆虫群落多样性及生态调控功能研究进展. 应用昆虫学报, 56(2): 183–194.]

Liu YF, Gui FY, Mo SY, Sun LC, Ge F, 2015. Sampling technologies and collecting methods for aquatic insects in rice paddy fields and their application. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 52(3): 770–775. [刘雨芳, 桂芳艳, 莫书银, 孙丽川, 戈峰, 2015. 稻田水生昆虫的采样技术方法与应用. 应用昆虫学报, 52(3): 770–775.]

Liu YF, Yang H, Yang F, Xie MQ, 2019. Ecological regulation effectiveness of habitat heterogeneity on predatory natural enemies and rice pests in rice paddy fields. *Acta Entomologica Sinica*, 62(7): 857–867. [刘雨芳, 杨荷, 阳菲, 谢美琦, 2019. 生境异质度对稻田捕食性天敌及水稻害虫的生态调节有效性. 昆虫学报, 62(7): 857–867.]

Lü ZZ, Wu XD, Hou HQ, Ji JH, Liu XM, Liu YR, 2017. Effect of different application ratios of chemical and organic fertilizers on soilquality in double cropping paddy fields. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 23(4): 904–913. [吕真真, 吴向东, 侯红乾, 冀建华, 刘秀梅, 刘益仁, 2017. 有机-无机肥配施比例对双季稻田土壤质量的影响. 植物营养与肥料学报, 23(4): 904–913.]

Ma FF, Xing SL, Gan MQ, Liu PS, Huang Y, Gan XY, Ma YH, 2019. Effects of organic fertilizer substituting for chemical fertilizer on rice yield, soil fertility and nitrogen and phosphorus loss in farmland. *Crops*, (5): 89–96. [马凡凡, 邢素林, 甘曼琴, 刘佩诗, 黄瑜, 甘晓玉, 马友华, 2019. 有机肥替代化肥对水稻产量、土壤肥力及农田氮磷流失的影响. 作物杂志, (5): 89–96.]

Maxime M, Donatello C, Romain R, Ingrid A, Damien M, Gills V, 2017. A survey on image-based insect classification. *Pattern Recognition*, 65: 273–284.