

# 崇明岛稻田三种种植方式下中小型土壤动物群落多样性

苏敬华<sup>①</sup> 王屿岑<sup>②</sup> 孔若楠<sup>③</sup> 王卿<sup>①</sup>

阮俊杰<sup>①</sup> 谭娟<sup>①</sup> 王敏<sup>①\*</sup>

① 上海市环境科学研究院 上海 200233; ② 华东师范大学生态与环境科学学院 上海 200241;

③ 东华大学环境科学与工程学院 上海 201620

**摘要:** 为探究不同种植方式对稻田中小型土壤动物多样性的影响,本研究选取上海市崇明岛常规、有机和生态(稻-渔共作)三种种植方式的稻田为研究样地,采用干漏斗法对其中的中小型土壤动物群落结构进行调查。结果表明,调查共捕获中小型土壤动物 449 头,分属 2 门 5 纲 8 目,优势类群为弹尾目(Collembola)物种,占总捕获量的 82.18%。三种种植方式稻田的中小型土壤动物群落结构有明显差异,其中,有机种植模式稻田的中小型土壤动物密度明显高于另外两种种植模式。中小型土壤动物群落的垂直分布呈现表聚性特征,类群数和密度均表现为向下减小的趋势。生态种植稻田的中小型土壤动物丰富度指数、Shannon-Wiener 指数和均匀度指数均为最高,有机种植稻田的中小型动物优势度指数最高。三种不同种植方式稻田的中小型动物呈中等程度相似。与常规和有机种植水稻方式相比,生态种植方式更有利于提高中小型土壤动物的多样性和均匀度水平,促进稻田生态系统的稳定与健康发展,对稻田种植的可持续性 & 农业面源污染的指示作用方面具有一定意义。

**关键词:** 稻田; 土壤动物; 稻渔共作; 生物多样性; 崇明岛

中图分类号: Q958 文献标识码: A 文章编号: 0250-3263 (2023) 03-381-09

## Diversity of Small and Medium-Sized Soil Animal Communities in Paddy Fields Under Different Rice Planting Patterns in Chongming Island, China

SU Jing-Hua<sup>①</sup> WANG Yu-Cen<sup>②</sup> KONG Ruo-Nan<sup>③</sup> WANG Qing<sup>①</sup>

RUAN Jun-Jie<sup>①</sup> TAN Juan<sup>①</sup> WANG Min<sup>①\*</sup>

① Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233; ② Faculty of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241; ③ College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China

**Abstract: [Objectives]** Small and medium-sized soil animals are important components of soil fauna in terrestrial ecosystems. Research shows that there are many biotic and abiotic factors that affect soil fauna

**基金项目** 上海市科委重大科研项目 (No. 19DZ1203404), 上海市生态环境科研项目 (沪环科 2020-8);

\* 通讯作者, E-mail: wangm@saes.sh.cn;

**第一作者介绍** 苏敬华, 女, 高级工程师; 研究方向: 城市生态系统调控与管理; E-mail: sujh@saes.sh.cn.

收稿日期: 2022-08-31, 修回日期: 2023-02-07 DOI: 10.13859/j.cjz.202303007

diversity in anthropogenic ecosystems such as paddy fields, and anthropogenic disturbance factors such as planting methods play the most obvious role. Chongming Island is an important agricultural planting area in Shanghai. The influence on ecosystem of rice farming is the focus in the rice production process. At present, although there have been some reports on the community structure and diversity characteristics of soil animals in paddy fields under different planting methods, these studies have not yet covered the three rice planting methods of conventional, organic and ecological (rice-fishing) in the same area. Therefore, the present study investigated the differences in the diversity of small and medium-sized soil animals under three rice cultivation methods. **[Methods]** This study set up three sample plots, which are all located on Chongming Island. The three plots are mainly cultivated with rice, and their natural vegetation and production background are basically the same. Their farming patterns were conventional planting, organic planting and ecological planting (Table 1). According to different rice growth stages, this study investigated the small and medium-sized soil animals in paddy fields in January, March, June and October, 2020, with a total of 4 samples. Small and medium-sized soil animals were separated by Tullgren method, and one-way ANOVA and Kruskal-Wallis  $H$  method were used to test the significance of differences. **[Results]** The results showed that a total of 449 small and medium-sized soil animals were obtained, belonging to 2 phyla, 5 classes, and 8 orders (Table 2). The dominant group was Collembola, accounting for 82.18% of the total catch. Among the three planting methods, Symphyla are only found in the soil of conventional paddy fields, Rosette is only found in the soil of organic paddy fields, and Hemiptera and Orthoptera are only found in the soil of ecological paddy fields. The community structure of small and medium-sized soil animals were significantly different in paddy fields under three planting methods, the density difference of small and medium-sized soil animals in different plots were significant, and the density of organic paddy fields was higher than the others (Fig. 1). The vertical distribution of small and medium-sized soil animal communities showed surface clustering characteristics, and the number and density of groups showed a downward trend (Fig. 2). There was no significant difference in the number of groups of small and medium-sized soil animals in different soil plots. The richness index, diversity index, and evenness index of small and medium-sized soil animals in ecological planting paddy fields were the highest, and the dominance index of organic planting paddy fields was the highest (Fig. 3). Three different planting patterns showed moderate similarity between any two groups. **[Conclusion]** Compared with conventional and organic planting patterns, ecological planting pattern is more conducive to improving the diversity and evenness of small and medium-sized soil animals and promoting the stability and healthy development of the paddy ecosystem. It is of significance to the sustainability of rice planting and as the indicator of agricultural non-point source pollution. At the same time, there are many factors affecting the community structure of small and medium-sized soil fauna in paddy fields, we suggest that further studies can be performed with the correlation among climate factors, physical and chemical indexes, and soil fauna community.

**Key words:** Paddy field; Soil animal; Rice-fish co-farming; Biodiversity; Chongming Island

水稻是重要的经济作物，而稻田则是陆地上受人为干扰最大的间歇性人工湿地，更是重要的内陆淡水生态系统（刘书通 2014）。干

湿交替是我国使用最多的水稻田灌溉技术。干湿交替会改变稻田土壤的理化性质，使得土壤颗粒的内聚力增加，土壤变得更紧实。此外，

水分的频繁变化会加速土壤中的有机质分解，促进土壤微生物活动。土壤湿处理过程中存活的土壤微生物会利用“干处理”阶段部分死亡的土壤微生物和氮素，从而出现土壤微生物量快速增加的现象。土壤动物作为陆地生态系统中重要的生物组分，在生态系统中承担了消费者和分解者的双重角色，其生存、觅食、排泄活动对土壤有机质的形成、土壤结构及土壤理化性质的变化都具有重要影响（殷秀琴等 2010）。其中，中小型土壤动物是陆地生态系统土壤动物群落的重要组成部分（徐演鹏等 2015），直接和间接地参与了生态系统中物质循环和能量流动的生态过程（武海涛等 2006），能有效指示土壤有机质层的生物活性，其群落结构等重要指标也能反映土壤的健康状况。目前，一些研究已对稻田系统中的中小型土壤动物多样性变化特征进行了报道，如研究发现湘潭锰矿废水污灌稻田中重金属污染程度与土壤动物数量减少和种群结构的变化有关，其中土壤动物数量与锰离子浓度的负相关达到极密切的程度（王振中等 1986），广西壮族自治区桂平市天然富硒区水稻土壤线虫对硒元素有敏感响应（宋佳平等 2022）等。

上海市委和市政府明确提出坚持生态立岛、绿色发展，把崇明岛建设成为世界级生态岛。崇明岛作为上海市农业大区，是上海市重要的“菜篮子”基地，水稻是其最主要的种植类型。因此，在大力发展崇明绿色农业的同时，要进一步关注水稻种植对农田生态系统的影响。有研究表明，影响稻田这类人为生态系统土壤动物多样性的生物和非生物因素有很多，而种植方式这种人为扰动因素的作用最为明显（沈君辉等 2002），如有机与常规种植方式下稻田土壤动物多样性存在差异，有机农田更有利于稻田生物多样性的维持与提高（王长永等 2007，王磊等 2018）。对农作物进行施肥、打药、灌溉等行为会对土壤动物产生显著的扰动作用（Nieminen 2007），但在一定条件下也能提高稻田土壤动物的多样性，并改善稻田土壤

及水体的理化指标，进而促进水稻增产（汤伟等 2021）。目前，不同种植方式对稻田土壤动物的群落结构、多样性特征的影响已有相关研究报道，如刘雯等（2021）报道了不同稻-渔共作方式下中小型土壤动物群落特征变化，但这些研究尚未涉及同一区域内常规、有机和生态（稻-渔共作）三种水稻种植方式对土壤动物多样性的影响。因此本研究选取上海市崇明岛为实验基地，对常规、有机和生态（稻-渔共作）三种水稻种植方式下的中小型土壤动物多样性进行比较研究，以期为稻田土壤动物多样性保育及不同种植方式下稻田土壤的生态健康状况研究提供数据参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

崇明岛（121°09'30" ~ 121°54'00" E，31°27'00" ~ 31°51'15" N）位于长江入海口，由泥沙冲积、围垦促淤沉积而成，总面积 1 269.1 km<sup>2</sup>，是世界上最大的河口冲积岛。崇明岛气候温和湿润，四季分明，年均气温 15.5 °C，年均降水量 1 096.9 mm，年均日照时数 2 104.0 h，年无霜期 229 d，属亚热带季风气候。崇明岛土壤有水稻土、潮土和盐土 3 种土类，土壤 pH 值为 7.5 ~ 8.1（孙玉冰等 2010）。研究区域以农业为主导产业，是上海市主要的粮食供应基地，主要农作物包括水稻、小麦、玉米和棉花等。崇明水稻种植方式以常规种植（施用化肥和化学农药）方式为主，自 2010 年开始向有机种植（施用有机肥、采取物理生物防治）和生态种植（稻-渔共作）方式转变。

本研究选取崇明岛现有的三种种植方式的稻田生态系统进行采样。三个稻田样地均位于崇明岛中部地区，土壤类型均为水稻土（孙玉冰等 2010），样地间的间距均在 100 m 以上。近 20 年来，三个稻田样地均以水稻种植为主，其自然植被和生产背景基本一致。其中，有机种植样地从 2017 年开始采用有机种植方式，生态种植样地从 2011 年起采用生态种植方式（表 1）。

表 1 样地概况

Table 1 General information of three sample plots

种植方式 Farming patterns	地理位置 Location	土壤类型 Soil type	施肥状况 Fertilizer	施农药状况 Pesticide	历史种植情况 History of planting
常规种植 Conventional farming	121°36'40" E 31°37'51" N	水稻土 Paddy soil	化肥 Fertilizer	施农药 Pesticide	长期为常规种植方式 Conventional farming for a long time
有机种植 Organic farming	121°46'49" E 31°31'18" N	水稻土 Paddy soil	有机肥 Organic fertilizer	未施农药 No pesticide	2017 年起采用有机种植方式 Since 2017, the organic farming model has been carried out
生态种植 (稻-甲鱼-小龙虾共作) Ecological farming (Rice-turtle-crayfish farming)	121°37'02" E 31°36'36" N	水稻土 Paddy soil	有机肥 Organic fertilizer	未施农药 No pesticide	2011 年起采用生态种植方式 Since 2011, the ecological farming model has been carried out

1.2 研究方法

1.2.1 实验设计 本研究根据水稻不同生长期，分别在 2020 年 1 月（休耕期）、3 月（幼苗期）、6 月（分蘖期）及 10 月（收割期）对稻田中小型土壤动物群落进行调查，共采样 4 次。采样时稻田均处于无灌水状态，土壤含水率在 23.1%~48.5% 之间。在三种不同种植方式的稻田样地中，随机选取面积 10 m × 10 m 的样方，每个样方选取 4 个样点，即将样方的四角连接，2 条对角线将样方划分为 4 部分，在 4 部分中心位置采样。采样点为相对平坦、无大的植物根系、无蚂蚁窝的区域。

1.2.2 采样和鉴定 每个样点使用直径 50.46 mm × 高 50 mm、容积 100 ml 的环刀，移除土壤表面凋落等，采集 0~5 cm、5~10 cm、10~15 cm 的稻田表层土壤。将土壤样品装入密封袋带回实验室，中小型土壤动物采用干漏斗法（Tullgren 法）进行分离，将收集到的中小型土壤动物用 75% 酒精固定，在解剖镜下观察鉴定，将样品鉴定到目水平，无法鉴定到目的样品，鉴定到纲。鉴定参照《中国土壤动物检索图鉴》（尹文英 1998）和《中国亚热带土壤动物》（尹文英 1992）。

1.3 数据分析

通过个体数占总捕获量的百分比划分各类群数量优势度：个体数占总捕获量 10% 以上为优势类群，个体数占总捕获量的 1%~10% 为常见类群，个体数占总捕获量的 1% 以下为稀有类群。

运用 Margalef 物种丰富度指数 ( $D$ ) (Ludwig et al. 1988)、Shannon-Wiener 指数

( $H'$ ) (Shannon 1948)、Pielou 均匀度指数 ( $J$ ) (马克平等 1994)、Simpson 优势度集中性指数 ( $C$ ) (Simpson 1949)、Jaccard 相似性系数 ( $C_j$ ) (Real et al. 1996) 对中小型土壤动物群落进行分析。

Margalef 物种丰富度指数 ( $D$ ):

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

Shannon-Wiener 多样性指数 ( $H'$ ):

$$H' = - \sum \frac{n_i}{N} \ln \frac{n_i}{N}$$

Pielou 均匀度指数 ( $J$ ):

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

Simpson 优势度集中性指数 ( $C$ ):

$$C = \sum \left( \frac{n_i}{N} \right)^2$$

Jaccard 相似性系数 ( $C_j$ ):  $C_j = \frac{j}{a + b - j}$

式中， $N$  为所有种的个体总数， $S$  为群落中物种数目， $n_i$  为第  $i$  种的个体数， $j$  为群落 A、B 共有类群数， $a$  为群落 A 含有的类群数， $b$  为群落 B 含有的类群数。

1.4 统计分析

使用 Excel 2010 和 SPSS 26.0 软件对数据进行处理与分析，并通过 Origin8.1 软件绘制图形。采用图示法及夏皮洛-威尔克法对数据进行正态性检验。当数据符合正态分布时，采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 进行差异显著性检验，方差齐性选择 LSD 事后比较法，方差不齐选择塔姆黑尼法。当数据不符合正态分布时，使用多样本秩和检验即 Kruskal-Wallis  $J$  检验 (Ostertagová et al. 2014)。

## 2 结果

### 2.1 群落组成与数量

调查期间 4 个季节共捕获中小型土壤动物 449 头, 分属 2 门 5 纲 8 目。以弹尾目物种为优势类群, 占捕获总数的 82.18%; 常见类群有真螨目 (5.57%)、双翅目幼虫 (4.90%)、鞘翅目幼虫 (2.90%) 和蜘蛛目 (1.78%) 等 4 类群, 共占总数的 15.15%; 其余 5 类群为稀有类群, 占总数的 2.67%, 为线虫纲、半翅目、直翅目、综合纲和啮目物种。

崇明岛三种种植方式稻田中小型土壤动物群落组成见表 2。常规种植样地调查发现中小型土壤动物 7 类, 优势类群为弹尾目, 占总数的 81.89%, 常见类群有鞘翅目、真螨目、蜘蛛目、双翅目、线虫纲和综合纲等共 6 类; 有机种植样地调查发现中小型土壤动物 6 类, 优势类群为弹尾目, 占总数的 89.38%, 常见类群有真螨目和双翅目, 鞘翅目、蜘蛛目和啮目为稀有类群; 生态种植样地鉴定到中小型土壤动物 8 类, 弹尾目为最优势类群, 占总数的 65.63%, 其次为双翅目, 常见类群有鞘翅目、直翅目、蜘蛛目、半翅目、真螨目和线虫纲等 6 类。三

种植方式的稻田优势类群均为弹尾目, 综合纲仅发现于常规种植的稻田土壤中, 啮目仅于有机稻田土壤中发现, 半翅目、直翅目则仅分布在生态种植稻田的土壤中。

根据正态性检验结果, 土壤动物类群数(图 1a) 和密度(图 1b) 采用多样本秩和检验进行差异性分析, 三种种植方式下稻田中小型土壤动物类群数差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 密度差异显著 ( $P < 0.05$ )。中小型土壤动物的密度以有机种植样地最高, 为 7 062.50 ind/m<sup>2</sup>, 高于常规种植样地的 3 968.75 ind/m<sup>2</sup> 和生态种植样地的 3 001.23 ind/m<sup>2</sup>, 有机种植样地显著高于生态种植样地 ( $P < 0.05$ )。与常规种植相比, 有机和生态种植的稻田中小型土壤动物密度差异均不显著 ( $P > 0.05$ )。

### 2.2 垂直分布

对崇明岛三种种植方式下稻田 0 ~ 15 cm 土层内中小型土壤动物的垂直分布状况的类群数(图 2a) 和密度(图 2b) 进行差异性分析, 三种种植方式下稻田中小型土壤动物群落在垂直分布上具有明显的表聚性, 类群数和密度均表现为向下减小的趋势。Kruskal-Wallis  $H$  检验

表 2 三种种植方式稻田中小型土壤动物群落组成

Table 2 Species composition of small and medium-sized soil animal communities in paddy fields under different farming patterns

类群 Groups	常规种植 Conventional farming			有机种植 Organic farming			生态种植 Ecological farming		
	个体数 Quantity (ind)	占比 (%) Proportion	多度 Abundance	个体数 Quantity (ind)	占比 (%) Proportion	多度 Abundance	个体数 Quantity (ind)	占比 (%) Proportion	多度 Abundance
弹尾目 Collembola	104	81.89	+++	202	89.38	+++	63	65.63	+++
真螨目 Acariformes	6	4.72	++	17	7.52	++	2	2.08	++
双翅目幼虫 Diptera Larvae	4	3.15	++	3	1.33	++	15	15.63	+++
鞘翅目幼虫 Coleopter Larvae	4	3.15	++	2	0.88	+	7	7.29	++
蜘蛛目 Araneae	5	3.94	++	1	0.44	+	2	2.08	++
线虫纲 Nematoda	2	1.57	++	0	0.00		2	2.08	++
半翅目 Hemiptera	0	0.00		0	0.00		3	3.13	++
直翅目 Orthoptera	0	0.00		0	0.00		2	2.08	++
综合纲 Symphyla	2	1.57	++	0	0.00		0	0.00	
啮目 Psocoptera	0	0.00		1	0.44	+	0	0.00	
合计 Total	127			226			96		

+++ 为优势类群 (占比超过 10%), ++ 为常见类群 (1% ~ 10%), + 为稀有类群 (占比低于 1%)。

+++ indicates dominant species (10%), ++ indicates common species (1% to 10%), + indicates rare species (1%).

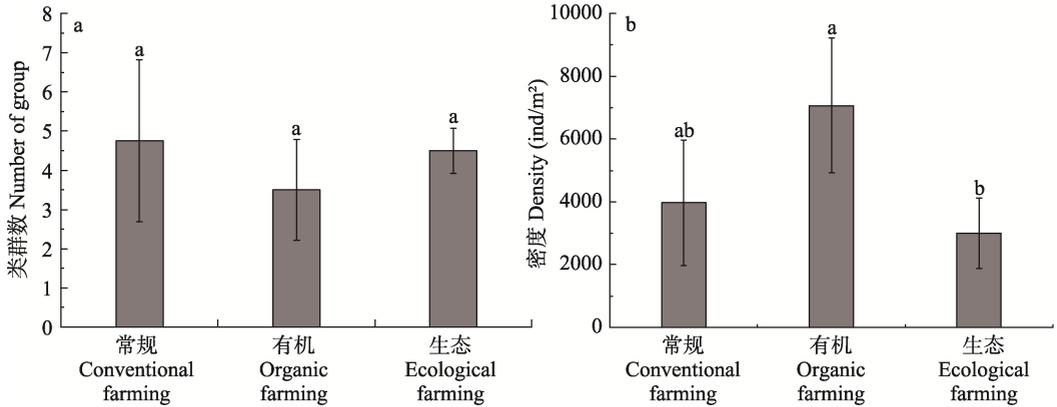


图 1 三种植植方式稻田中小型土壤动物类群数 (a) 及密度 (b)

Fig. 1 Group number (a) and densities (b) of small and medium-sized soil animals in paddy fields under three farming patterns

小写字母不同表示数据差异显著 ( $P < 0.05$ )。The values with different lowercase letters indicate significant differences ( $P < 0.05$ ).

结果显示, 有机种植样地的各土层间中小型土壤动物类群数差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 密度差异显著 ( $P < 0.05$ ); 常规种植样地的各土层间中小型土壤动物类群数差异显著 ( $P < 0.05$ ), 密度差异不显著 ( $P > 0.05$ ); 生态种植样地的各土层间中小型土壤动物类群数和密度差异均不显著 ( $P > 0.05$ )。

度在 0 ~ 5 cm 土层差异显著 ( $P < 0.05$ ), 其中有机种植样地显著高于生态种植样地 ( $P < 0.05$ )。三样地间中小型土壤动物的密度在 5 ~ 10 cm 和 10 ~ 15 cm 土层差异均不显著 ( $P > 0.05$ )。

三样地间中小型土壤动物的类群数在 0 ~ 5 cm、5 ~ 10 cm 和 10 ~ 15 cm 土层差异均不显著 ( $P > 0.05$ )。三样地间中小型土壤动物的密

### 2.3 多样性指数

崇明岛三种不同种植方式下, 稻田中小型土壤动物群落丰富度指数 ( $D$ ) (图 3a)、Shannon-Wiener 指数 ( $H'$ ) (图 3b) 和均匀度指数 ( $J$ ) (图 3c) 规律表现相同, 由大到小

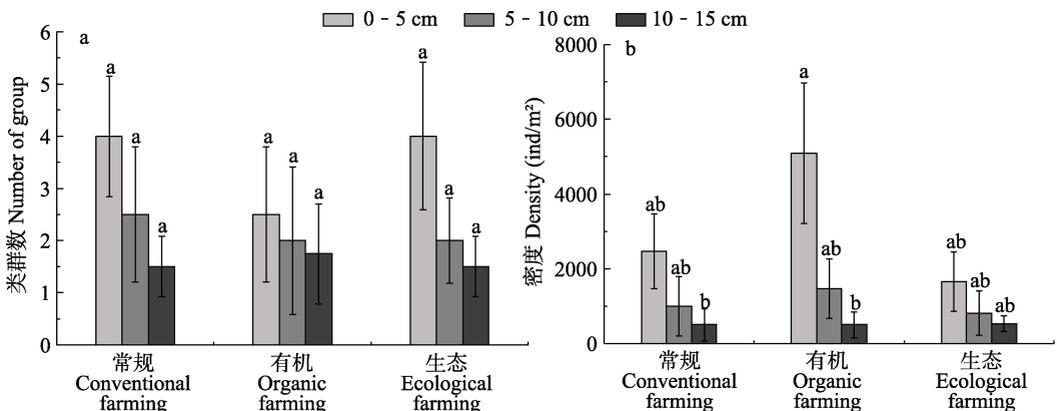


图 2 三种植植方式稻田中小型土壤动物类群数 (a) 与密度 (b) 垂直分布特征

Fig. 2 Vertical distribution of group number (a) and densities (b) of small and medium-sized soil animals in paddy fields under three farming patterns

小写字母不同表示数据差异显著 ( $P < 0.05$ )。The values with different lowercase letters indicate significant differences ( $P < 0.05$ ).

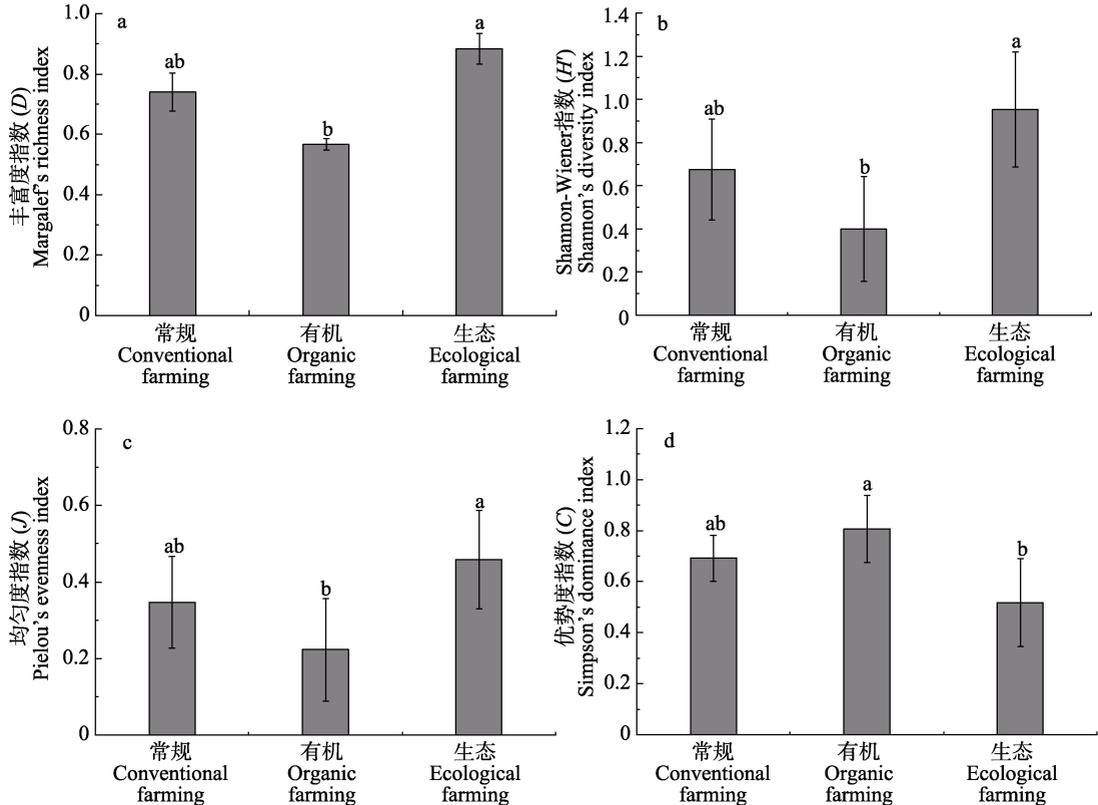


图 3 三种种植方式稻田中小型土壤动物群落丰富度指数 (a)、Shannon-Wiener 指数 (b)、均匀度指数 (c) 及优势度指数 (d)

Fig. 3 Margalef's richness index (a), Shannon's diversity index (b), Pielou's evenness index (c), Simpson's dominance index (d) of small and medium-sized soil animals in paddy fields under three farming patterns

小写字母不同表示数据差异显著 ( $P < 0.05$ )。The values with different lowercase letters indicate significant differences ( $P < 0.05$ )。)

均为生态种植样地、常规种植样地、有机种植样地；优势度指数 (C) (图 3d) 由大到小则为有机种植样地、常规种植样地、生态种植样地。

根据正态性检验结果，Shannon-Wiener 指数和均匀度指数采用单因素方差分析 (one-way ANOVA)，丰富度指数和优势度指数采用多样本秩和检验 (Kruskal-Wallis  $H$ )，三样地间中小型土壤动物的丰富度指数存在极显著差异 ( $P < 0.01$ )，Shannon-Wiener 指数和优势度指数均存在显著差异 ( $P < 0.05$ )，而均匀度指数差异不显著 ( $P > 0.05$ )。生态种植样地的丰富度指数极显著高于有机种植样地 ( $P < 0.01$ )；Shannon-

Wiener 指数和均匀度指数均显著高于有机种植样地 ( $P < 0.05$ )，优势度指数显著低于有机种植样地 ( $P < 0.05$ )，而三类指数与常规种植样地差异均不显著 ( $P > 0.05$ )。有机种植样地的丰富度指数、Shannon-Wiener 指数、均匀度指数和优势度指数与常规种植样地差异均不显著 ( $P > 0.05$ )。

## 2.4 群落相似性

计算三种种植方式稻田中小型动物群落相似性，结果表明，三种不同种植方式中两两均表现为中等程度相似。有机种植方式与常规种植方式之间中小型动物群落相似性系数为 0.625，有机种植与生态种植间为 0.556，常规

种植与生态种植间为 0.667。

### 3 讨论

三种不同种植方式中小型动物密度存在显著差异,对土壤动物群落组成、优势类群的影响不同。有机种植稻田的中小型土壤动物密度最大,这与常规种植稻田采用化学农药方式控制病虫害有直接关联关系,导致常规种植方式的稻田土壤动物密度、类群数以及群落多样性等偏低。而有机种植稻田采用物理和绿色防治方式控制病虫害和田间杂草,因此造成常规和有机两种种植方式下中小型土壤动物群落的显著差异。同时,生态种植方式下稻田中小型土壤动物密度显著低于常规和有机种植方式,这主要是因为是在稻田淹水期间,与水稻共作的克氏原螯虾 (*Procambarus clarkii*)、中华绒螯蟹 (*Eriocheir sinensis*) 等对底质具有较强的扰动作用,其生命活动改变了稻田底质环境,因此稻-渔共作方式的稻田中小型土壤动物的密度低于其他种植方式的稻田。常规种植和有机种植稻田中小型土壤动物的优势类群均为弹尾目和真螨目,这基本与国内外多数地区土壤动物的组成相同 (Eleusa et al. 2002, 武海涛等 2006, 殷秀琴等 2010, 任婷等 2012)。但在生态种植稻田的中小型土壤动物中,除弹尾目 (65.63%) 占绝对优势外,双翅目和鞘翅目幼虫也占一定优势,这与刘雯等 (2021) 研究发现的生态种植方式比常规种植方式更有利于中小型土壤动物类群数增加的结果相同。本研究同时发现生态种植方式中小型土壤动物类群数也高于有机种植方式。

三种种植方式下稻田中小型土壤动物群落具有明显的表聚性,类群数和密度均表现为向下减小的趋势。而有机种植方式中小型土壤动物密度的垂直分布差异显著,这可能是由于有机肥增施为中小型土壤动物提供了充足的养分,有利于土壤动物生存,从而造成表层土壤动物密度较高;生态种植中小型土壤动物密度的垂直分布差异不显著,这可能是由于共作物

种克氏原螯虾、中华绒螯蟹等对底质垂直扰动,使土壤垂直环境相对均匀。

三种不同种植方式稻田的中小型土壤动物多样性分析结果显示: Simpson 优势度指数由大到小为有机种植样地、常规种植样地、生态种植样地,表明生态种植稻田中小型土壤动物的种类最为丰富; Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数由大到小均为生态种植样地、常规种植样地、有机种植样地,表明生态种植稻田中小型土壤动物群落结构的稳定性更高,生态(稻-渔共作)种植方式比常规和有机种植方式更有利于中小型土壤动物的多样性提高,这主要由于稻-渔共作方式下稻田生态系统保持着较为稳定的中度营养状态。因此生态种植模式不仅有利于水稻和共作物种的生长,同时可以维持较高的底质环境的动物多样性 (Li et al. 2021)。有机种植方式下中小型土壤动物的种类最为单一,丰富度、多样性及均匀度均为最低,这与有机种植方式干扰小有直接关系。有机种植方式既没有常规种植方式下施用农药的干扰,又没有生态种植方式下共作物种对底质环境的干扰,优势类群可以占据更多资源,从而不断扩展使得某些特化类群的生存资源减小、甚至消失,进而导致类群数的减少。

综上所述,与常规和有机种植水稻方式相比,生态种植方式更有利于提高中小型土壤动物的多样性和均匀度水平,促进稻田生态系统的稳定与健康发展,对稻田种植的可持续性 & 农业面源污染的指示作用方面具有一定意义。同时,影响稻田中小型土壤动物群落结构的因素众多,若能同时分析温度、降雨等气候因素及土壤含水率等理化指标与中小型土壤动物群落的相关性,将更好地揭示其相互作用关系,这些仍待进一步研究。

### 参 考 文 献

- Eleusa B, Beto P, Reginaldo C, et al. 2002. Effects of land-use system on the soil macroanimal in western Brazilian Amazonia. *Biology*

- and Fertility of Soils, 35(3): 1–8.
- Li F, Gao J, Xu Y, et al. 2021. Biodiversity and sustainability of the integrated rice-fish system in Hani terraces, Yunnan province, China. *Aquaculture Reports*, 20(1): 1–8.
- Ludwig J A, Reynolds J F. 1988. *Statistical Ecology*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Nieminen J K. 2007. Soil animals and ecosystem processes: How much does nutrient cycling explain? *Pedobiologia International Journal of Soil Biology*, 51(5): 367–273.
- Ostertagová E, Ostertag O, Kováč J. 2014. Methodology and application of the Kruskal-Wallis test. *Applied Mechanics and Materials*, 611: 115–120.
- Real R, Vargas J M. 1996. The probabilistic basis of Jaccard's index of similarity. *Systematic Biology*, 45(3): 380–385.
- Shannon C E. 1948. A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 27(3): 379–423.
- Simpson E H. 1949. Measurement of diversity. *Nature*, 163(1): 688–688.
- 刘书通. 2014. 长江中下游地区水稻生产能力分析. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文.
- 刘雯, 李娜, 鞠民, 等. 2021. 在不同稻渔共作模式下中小型土壤动物群落特征研究. *江西师范大学学报: 自然科学版*, 45(2): 188–193.
- 马克平, 刘玉明. 1994. 生物群落多样性的测度方法 I  $\alpha$  多样性的测度方法 (下). *生物多样性*, 2(4): 231–239.
- 任婷, 安建梅, 董侃, 等. 2012. 山西临汾市郊土壤动物生态分布特征. *动物学杂志*, 47(1): 62–70.
- 沈君辉, 刘光杰, 袁明. 2002. 我国稻田节肢动物群落研究新进展. *中国农学通报*, 18(4): 90–93.
- 宋佳平, 袁林喜, 刘晓东, 等. 2022. 天然富硒区广西壮族自治区桂平市水稻土壤线虫群落结构特征及其指示意义. *科学通报*, 67(6): 537–547.
- 孙玉冰, 邓守彦, 李德志, 等. 2010. 崇明县土壤主要理化指标的空间分布与变异特征. *生态与农村环境学报*, 26(4): 306–312.
- 汤伟, 陈灿, 黄璜. 2021. 不同稻田种养模式对土壤与水理化性状及水稻产量的影响分析. *作物研究*, 35(5): 490–495.
- 王长永, 王光, 万树文, 等. 2007. 有机农业与常规农业对农田生物多样性影响的比较研究进展. *生态与农村环境学报*, 23(1): 75–80.
- 王磊, 李刚, 席运官, 等. 2018. 有机种植方式对稻田动物多样性的影响: 以句容戴庄为例. *生态与农村环境学报*, 34(7): 614–621.
- 王振中, 张友梅, 贺跃明, 等. 1986. 重金属污染的稻田土壤中动物群落的研究. *环境科学*, 7(6): 34–39.
- 武海涛, 吕宪国, 杨青, 等. 2006. 土壤动物主要生态特征与生态功能研究进展. *土壤学报*, 43(2): 314–323.
- 徐演鹏, 谭飞, 胡彦鹏, 等. 2015. 秸秆还田对黑土区农田中小型土壤节肢动物群落的影响. *动物学杂志*, 50(2): 262–271.
- 尹文英. 1992. *中国亚热带土壤动物*. 北京: 科学出版社.
- 尹文英. 1998. *中国土壤动物检索图鉴*. 北京: 科学出版社.
- 殷秀琴, 宋博, 董炜华, 等. 2010. 我国土壤动物生态地理研究进展. *地理学报*, 65(1): 91–102.