

DOI: 10.11766/trxb202109240513

唐琪, 曹蕾, 钱建南, 汤逸帆, 申建华, 韩建刚. 沼液替代化肥对稻田土壤节肢动物群落的影响[J]. 土壤学报, 2023, 60(3): 904-912.
TANG Qi, CAO Lei, QIAN Jiannan, TANG Yifan, SHEN Jianhua, HAN Jiangang. Effects of biogas slurry instead of chemical fertilizer on soil arthropod community in paddy field[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(3): 904-912.

沼液替代化肥对稻田土壤节肢动物群落的影响*

唐琪^{1, 2}, 曹蕾¹, 钱建南³, 汤逸帆¹, 申建华⁴, 韩建刚^{1, 2†}

(1. 南京林业大学生物与环境学院, 南京 210037; 2. 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京 210037; 3. 江苏金东台农业发展有限公司, 江苏东台 224200; 4. 中粮家佳康(江苏)有限公司, 江苏东台 224200)

摘要: 土壤节肢动物群落对施肥管理响应灵敏, 是反映农田生态系统健康与稳定的重要指标。本文以江苏滩涂围垦稻田为例进行田间小区试验, 研究沼液不同比例替代化肥(0、33%、66%和100%)对土壤节肢动物群落在0~20 cm土层分布及多样性的影响。结果表明: 各施肥处理下稻田土壤节肢动物优势类群均为前气门亚目(Prostigmata)、弹尾纲(Collembola)和甲螨亚目(Oribatida), 分别占总密度的45.44%、20.00%、13.38%。沼液替代化肥(即沼液与化肥配施)有利于提高土壤节肢动物密度、多样性指数和丰富度指数。当沼液替代化肥比例为66%时(施N总量为225 kg·hm⁻²), 土壤节肢动物密度、多样性指数和丰富度指数均显著高于纯化肥(沼液替代化肥比例为0)处理($P < 0.05$), 分别较纯化肥增加129.25%、8.67%和34.78%。相关性分析表明, 土壤有机碳和全氮是影响稻田土壤节肢动物密度的主要因子。

关键词: 沼液; 土壤节肢动物; 沼液替代化肥; 稻田

中图分类号: S154.5 文献标志码: A

Effects of Biogas Slurry Instead of Chemical Fertilizer on Soil Arthropod Community in Paddy Field

TANG Qi^{1, 2}, CAO Lei¹, QIAN Jiannan³, TANG Yifan¹, SHEN Jianhua⁴, HAN Jiangang^{1, 2†}

(1. College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. Co-Innovation Center for the Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 3. Jiangsu Jindongtai Agricultural Development Co. Ltd., Dongtai, Jiangsu 224200, China; 4. COFCO Jiakiang (Jiangsu) Co. Ltd., Dongtai, Jiangsu 224200, China)

Abstract: **【Objective】** Soil arthropod is an important part of the soil ecosystem. They play an important role in decomposing organic matter, improving soil physical and chemical properties, improving soil fertility and promoting plant nutrient absorption. The arthropod community is sensitive to fertilization management and is, therefore an important indicator reflecting the health and stability of the farmland ecosystem. **【Method】** Soil samples were collected from experimental plots of reclaimed paddy fields in Jiangsu Tidal Flat, which has been running for 6 years. The plots were treated with biogas slurry instead of chemical fertilizer

* 国家重点研发计划项目(2017YFC0505803)和江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFC0505803) and the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions (PAPD)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: hjg@njfu.edu.cn

作者简介: 唐琪(1998—), 女, 江西赣州人, 硕士研究生, 主要从事废弃物资源化利用研究。E-mail: 184938578@qq.com

收稿日期: 2021-09-24; 收到修改稿日期: 2022-01-29; 网络首发日期(www.cnki.net): 2022-04-11

(0, 33%, 66% and 100%). The collected samples were analyzed for the effects of each treatment on species, quantity, community density and diversity of soil arthropods, and their relationship with the changes of soil properties. 【Result】 In the treatment of biogas slurry instead of chemical fertilizer, 1 024 soil animals were collected, belonging to 9 classes and 18 groups. The results showed that the dominant groups of soil arthropods in the paddy field under each fertilization treatment were Prostigmata, Collembola and Oribatida, accounting for 45.44%, 20% and 13.38% of the total density, respectively. Biogas slurry instead of chemical fertilizer (i.e. combined application of biogas slurry and chemical fertilizer) is beneficial for improving the density, diversity index and richness index of soil arthropods. When the ratio of biogas slurry to chemical fertilizer was 66% (the total amount of N applied was 225 kg·hm⁻²), the density, diversity index and richness index of soil arthropods were significantly higher than those of pure chemical fertilizer (the ratio of biogas slurry to chemical fertilizer was 0) ($P < 0.05$). Compared with pure chemical fertilizer, it increased by 129.25%, 8.67% and 34.78%, respectively. Correlation analysis showed that soil organic carbon and total nitrogen were the main factors affecting soil arthropod density in paddy fields. 【Conclusion】 The combined application of biogas slurry and chemical fertilizer has a significant effect on the soil arthropod community in paddy fields. From the effect of different proportions of biogas slurry replacing chemical fertilizer on soil arthropod density and community structure, the combined application of biogas slurry and chemical fertilizer is recommended instead of replacing chemical fertilizer.

Key words: Biogas slurry; Soil arthropods; Biogas slurry replaces chemical fertilizer; Paddy field

节肢动物是土壤生态系统的重要组成部分, 在分解有机质、改善土壤理化性质、提高土壤肥力、促进植物对养分的吸收等方面发挥关键作用^[1-3]。土壤节肢动物的群落特征可作为反映土壤肥力变化及生态稳定性的重要指标^[4-5]。施肥管理对土壤理化性质的改变, 可能对土壤动物群落造成显著影响^[6-7]。研究发现, 施氮肥会减少土壤螨虫和弹尾目的数量^[8], 氮磷混施则显著提高了土壤微节肢动物的丰度^[9]。有研究发现有机肥和化肥均增加了土壤微节肢动物的丰度, 但对多样性指数没有显著影响^[10]。有机肥配施化肥有利于增加土壤动物群落的丰富度和多样性, 维持土壤动物群落稳定性^[11]。

沼液是畜禽养殖粪污充分厌氧发酵后残留的液体副产物, 富含氮素及多种营养元素^[12]。尤其是大型集约化养殖场沼气工程后沼渣与沼液充分分离, 沼液熟化完全, 重金属等潜在污染物含量低, 近年来已成为种养结合和循环农业化学氮肥的优质替代品^[13-14], 在增加农作物产量和提升品质方面发挥重要作用^[15-16]。目前有关沼液替代化肥效应机理的探讨, 主要集中在不同沼液施用量或沼液与化肥配施对土壤团粒结构、养分含量等物理化学性状^[16-17]、土壤酶活性^[18]以及重金属积累、迁移与转化的影响^[19]等方面。初步研究表明, 沼液施用对土壤动物的影响不容忽视。如玉米地施用沼液对蚯蚓密度和生物量均有促进作用^[20]; 而对草地土壤中的弹尾纲密度

有负面影响, 施用沼液 3 d 后弹尾纲密度下降约 90%^[21]; 对设施大棚内土壤线虫的数量也有明显的抑制作用^[22]。可见不同土壤动物种类对沼液施用的响应差异较大, 同时受植物种植、土壤性状等的综合影响。但有关沼液施用对土壤节肢动物的研究十分有限^[23], 尤其对于消纳沼液最主要的农田类型——稻田土壤节肢动物的相关认识还相当缺乏。

因此, 本研究以连续运行 6 年的江苏滩涂围垦稻田定位试验地为基础, 设置沼液不同比例 (0%、33%、66% 和 100%) 替代化肥处理, 并分析各处理对土壤节肢动物种类、数量、群落密度及多样性的影响, 及其与土壤性状变化的关系, 以期对稻田沼液的合理高效消纳及其生态风险评估提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区域位于江苏省东台市黄海猪场沼气站附近 (32°38'25"N, 120°54'17"E), 属亚热带和暖温带气候的过渡区。年均气温 15℃, 年均降雨量 1 190 mm, 无霜期 220 d。研究区农田由滩涂围垦改良形成, 种植制度为稻麦两熟制, 水稻种植周期为每年的 6 月下旬—10 月下旬, 10 月下旬至次年 6 月种植冬小麦。

1.2 供试材料

供试土壤质地为粉砂质壤土, 砂粒、粉粒和黏粒含量占比分别为 36.2%、56.7%和 7.1%。土壤偏碱性, pH8.28, 电导率 (EC) $102.2 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 土壤有机碳 (SOC) $4.58 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全氮 (TN) $0.48 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全磷 (TP) $0.60 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全钾 (TK) $16.92 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

供试沼液采集自中粮家佳康 (江苏) 有限公司, 其生产过程为: 猪场粪污经水泡粪工艺收集, 通过匀浆池后进入发酵罐, $36\sim 38^\circ\text{C}$ 下全混合厌氧反应器 (CSTR) 发酵 15 d。液体进入贮存池并稳定 1~2 个月, 底部为沼渣, 中上部为沼液。供试沼液基本理化性质见表 1。

表 1 供试沼液理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of biogas slurry

样品 Sample	有机碳 Total organic carbon/ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	铵态氮 $\text{NH}_4^+ \text{-N/}$ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	硝态氮 $\text{NO}_3^- \text{-N/}$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	全氮 Total nitrogen/ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	pH	电导率 Electrical conductivity/ ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)
沼液 Biogas slurry	1.43±0.31	1.01±0.03	33.11±4.25	1.50±0.48	7.83±0.04	10.20±2.03

注: 表中值为均值±标准差 ($n=3$)。Note: The values are mean ± standard deviation ($n=3$) .

1.3 试验设计

田间小区定位实验始于 2016 年, 共设沼液替代化肥比例 0%、33%、66%和 100% 4 个处理 (分别对应为 S0、S1、S2 和 S3)。控制总氮量相同, 即施加沼液折合的氮与补施化肥 (尿素) 氮总量均为 $225 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。每个处理均设 3 个重复, 所有小区为 ($6 \text{ m}\times 10 \text{ m}$) 随机排列。小区间垒田埂 (宽 50 cm, 高 30 cm), 铺设防渗布, 区内设保护行。沼液分别在水稻基肥、蘖肥和穗肥期施入, 比例为 2:1:2。各处理沼液与灌溉水总量保持相同, 田间管理与当地大田一致。

1.4 样品采集及分析

于 2020 年 10 月水稻收获后 (水稻品种为淮稻 5 号) 进行土壤样品采集, 各处理小区按对角线法选取 5 个样点, 采集 0~20 cm 土壤样品, 剔除石砾和植物残体等杂质, 装入密封袋带回实验室。一部分土壤样品用于收集土壤节肢动物, 其余部分用于土壤理化性质的测定。

采用 Tullgren 干漏斗分离收集土壤节肢动物^[23]。分离出的土壤节肢动物标本存放于 75%乙醇溶液中。用生物显微镜 (ECLIPSE E200MV, 南京尼康江南光学仪器有限公司) 进行鉴定计数并参照《中国土壤动物检索图鉴》^[24]和《昆虫分类》^[25]进行分类。

土壤 pH 采用 pH 计 (pHS-3C) 测定 (土:液=1:5)。EC 使用电导率仪测定 (土:液=1:5)。土

壤有机碳采用 TOC 分析仪测定, 全氮采用凯氏定氮法测定, 全磷和全钾经氢氧化钠消解后分别采用钼锑抗分光光度法和原子吸收分光光度法测定。

1.5 数据处理

土壤动物密度数据将分离的土壤动物个体数量换算成密度 ($\text{ind}\cdot\text{m}^{-2}$), 即个体数量/采样面积。

类群等级划分^[26]: 平均密度占总密度 10%以上为优势类群 (+++), 1%~10%为常见类群 (++), 1%以下稀有类群 (+)。

土壤动物群落多样性分析包括: Shannon-Wiener 多样性指数 (H)、Simpson 优势度指数 (C)、Pielou 均匀度指数 (J)、丰富度指数 (用类群数表示)。

$$H = -\sum (P_i \ln P_i)$$

$$C = -\sum P_i^2$$

$$J = H / \ln S$$

式中, $P_i = n_i / N$, n_i 为第 i 个类群的个体数, N 为总个体数, S 为总类群数。

数据分析前, 对不服从正态分布数据进行 $\log(X+1)$ 转换, 采用 SPSS 26.0 软件进行单因素方差分析不同处理间的差异, 并用邓肯 (Duncan) 法对不同处理之间进行差异显著性检验 ($P < 0.05$)。皮

尔森相关系数用于分析土壤节肢动物与土壤理化性质的关系。采用主成分分析 (Principal component analysis, PCA) 分析不同比例沼液替代化肥处理对土壤动物群落的影响。土壤节肢动物群落多样性分析用 R 4.0.5 计算, 使用 Origin 9.0 软件制图。

2 结 果

2.1 沼液替代化肥对土壤理化性质的影响

沼液替代化肥处理间的土壤有机碳 (SOC)、全氮 (TN)、全钾 (TK) 和 C/N 有明显差异 (表 2)。具体表现为 S2 处理的 SOC 含量和 TN 含量显著高于 S0 和 S3 处理 ($P < 0.05$), S1 处理 TK 含量显著高于其他处理 ($P < 0.05$), 其他土壤性状差异不显著。

2.2 沼液替代化肥对土壤节肢动物群落组成和密度的影响

沼液替代化肥 4 个处理中, 共获得 1 024 只土壤动物, 隶属 9 纲 18 个类群 (表 3), 优势类群均为前气门亚目 (Prostigmata)、弹尾纲 (Collembola) 和甲螨亚目 (Oribatida), 分别占总密度的 45.44%、20.00%、13.38%; 常见类群为蜘蛛目 (Araneida)、软甲纲 (Malacostraca)、综合纲 (Symphyla)、少足纲 (Pauropoda)、双尾纲 (Diplura)、蜚蠊目 (Blattodea)、鞘翅目 (Coleoptera) 和双翅目 (Diptera), 共占总密度的 19.21%; 其余为稀有类群, 共占总密度的 1.97%。石蛎目为 S1 处理特有类群, 缨翅目为 S2 特有类群, 直翅目为 S3 特有类群, 啮目为 S0 特有类群。唇足纲仅出现在 S1 和 S2 处理中, 革翅目仅出现在 S0 和 S3 处理中。

不同沼液替代化肥处理的土壤节肢动物密度有

显著差异 (图 1)。S2 处理 (沼液替代化肥比例为 66%) 土壤节肢动物密度显著高于 S0 处理 ($P < 0.05$), 与纯化肥 (S0) 相比, S2 处理总密度增加 129.25%, S1、S2 和 S3 处理间差异不显著; 各处理的土壤节肢动物密度排序为 $S2 > S1 > S3 > S0$ 。

2.3 沼液替代化肥对土壤节肢动物群落多样性的影响

土壤节肢动物群落的多样性指数、均匀度指数和丰富度指数在不同沼液替代比例处理间差异显著 (图 2), 优势度指数在不同处理间无显著差异。S0 处理的土壤节肢动物多样性指数最低, 并且均显著低于 S1、S2 和 S3 处理 ($P < 0.05$)。与 S0 处理相比, S1、S2、S3 处理的多样性指数分别增加了 8.79%、8.67% 和 5.65%。各处理下的优势度指数差异均不显著。S3 处理的均匀度指数最低, 并且显著低于 S0 处理 ($P < 0.05$)。丰富度指数以 S3 处理最大, 并且 S1、S2、S3 处理均显著高于 S0 处理, 分别较 S0 处理增加 39.13%、34.78% 和 52.17%。

2.4 土壤节肢动物群落与土壤理化性质的相关性

将土壤节肢动物密度、多样性指数等以及密度占比最高的前五个类群分别与土壤理化性质进行相关性分析, 结果表明 (表 4), 在沼液代替化肥处理中, 土壤节肢动物密度与 TN 显著正相关, 优势度指数与 EC 显著负相关, 丰富度指数与土壤 pH 显著正相关。弹尾纲与 SOC 和 EC 显著正相关, 双尾纲与土壤 SOC、TN 显著正相关。

2.5 沼液替代化肥对土壤节肢动物群落的影响

为进一步探讨沼液替代化肥对土壤节肢动物群落的影响, 将所有节肢动物类群进行主成分分析 (图 3)。结果表明, 第一主成分 (横轴) 和第二主成分 (纵

表 2 不同处理土壤理化性质指标

Table 2 Soil physical and chemical parameters under different treatments

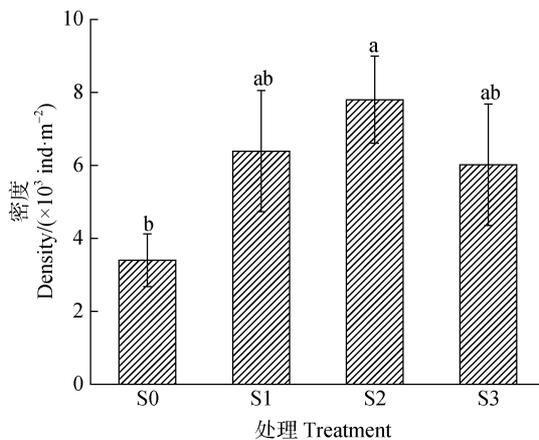
处理 Treatment	SOC/ (g·kg ⁻¹)	TN/ (g·kg ⁻¹)	TP/ (g·kg ⁻¹)	TK/ (g·kg ⁻¹)	C/N	pH	EC/ (μs·cm ⁻¹)
S0	5.84±0.46ab	0.52±0.04b	0.54±0.03a	16.24±0.25b	12.57±0.81ab	8.38±0.07a	181.0±2.8a
S1	6.44±0.31a	0.54±0.03ab	0.62±0.05a	16.89±0.29a	13.21±0.76a	8.43±0.12a	181.3±9.1a
S2	6.70±0.44a	0.61±0.04a	0.56±0.04a	15.88±0.39b	11.67±0.24b	8.49±0.05a	176.3±5.3a
S3	5.32±0.15b	0.58±0.01ab	0.61±0.01a	16.12±0.08b	11.14±0.41b	8.53±0.04a	185.3±2.6a

注: S0: 沼液替代化肥 0%; S1: 沼液替代化肥 33%; S2: 沼液替代化肥 66%; S3: 沼液替代化肥 100%。表中值为均值 ± 标准差 ($n=3$); 同一列中无相同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。Note: S0: Biogas slurry instead of fertilizer 0%; S1: Biogas slurry replaces 33% of chemical fertilizer; S2: Biogas slurry to replace fertilizer 66%; S3: Biogas slurry can replace fertilizer 100%. The values are mean ± standard deviation ($n=3$); No same letter in the same column indicates significant difference between treatments ($P < 0.05$).

表3 沼液替代化肥处理的土壤节肢动物群落组成及密度

Table 3 Compositions of soil arthropod community under different fertilization treatments

类群 Group	密度 Density/ (ind·m ⁻²)					占比 Ratio/%
	S0	S1	S2	S3	平均 Average	
蜘蛛目 Araneida	46.30 (++)	115.74 (++)	138.89 (++)	138.89 (++)	109.96 (++)	1.86
前气门亚目 Prostigmata	1643.52 (+++)	2847.22 (+++)	3240.74 (+++)	2997.69 (+++)	2682.29 (+++)	45.44
甲螨亚目 Oribatida	601.85 (+++)	717.59 (+++)	856.48 (+++)	983.80 (+++)	789.93 (+++)	13.38
软甲纲 Malacostraca	46.30 (++)	92.59 (++)	92.59 (++)	46.30 (+)	69.45 (++)	1.18
唇足纲 Chilopoda	—	46.30 (+)	46.30 (+)	—	23.15 (+)	0.39
综合纲 Symphyla	92.59 (++)	92.59 (++)	115.74 (++)	69.44 (++)	92.59 (++)	1.57
少足纲 Pauropoda	46.30 (++)	185.19 (++)	231.48 (++)	115.74 (++)	144.68 (++)	2.45
弹尾纲 Collembola	462.96 (+++)	1226.85 (+++)	2106.48 (+++)	925.93 (+++)	1180.56 (+++)	20.00
双尾纲 Diplura	46.30 (++)	393.52 (++)	486.11 (++)	277.78 (++)	300.93 (++)	5.10
石蛎目 Microcoryphia	—	46.30 (+)	—	—	11.58 (+)	0.20
蜚蠊目 Blattodea	115.74	277.78 (++)	162.04 (++)	138.89 (++)	173.61 (++)	2.94
直翅目 Orthoptera	—	—	—	34.72 (+)	8.68 (+)	0.15
革翅目 Dermaptera	46.30 (++)	—	—	57.87 (+)	26.04 (+)	0.44
半翅目 Hemiptera	46.30 (++)	46.30 (+)	—	—	23.15 (+)	0.39
啮目 Corrodentia	46.30 (++)	—	—	—	11.58 (+)	0.20
缨翅目 Thysanoptera	—	—	46.30 (+)	—	11.58 (+)	0.20
鞘翅目 Coleoptera	—	92.59 (++)	115.74 (++)	104.17 (++)	78.13 (++)	1.32
双翅目 Diptera	162.04 (++)	208.33 (++)	162.04 (++)	127.31 (++)	164.93 (++)	2.79



注：无相同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)；图中误差线为标准差。下同。Note: No same lowercase letter indicates significant difference between treatments ($P < 0.05$); The error bar in the figure is the standard deviation. The same below.

图1 沼液替代化肥处理下的土壤节肢动物密度

Fig. 1 The effect of biogas slurry instead of chemical fertilizer treatment on soil arthropod density

轴)分别解释了土壤节肢动物密度变化的92.7%和2%。第一主成分将纯化肥和纯沼液(S0和S3)与沼液和化肥配施(S1、S2)处理明显分开,反映了S0、S3与S1、S2处理土壤节肢动物群落组成的差别。前气门亚目、甲螨亚目和弹尾纲对不同比例沼液替代化肥处理有明显的相关性,其中弹尾纲在S1和S2处理中密度较大,表明沼液与化肥配施对弹尾纲有明显的促进作用;而S0和S3处理对前气门亚目和甲螨亚目影响最大。其他类群之间相关性较高,但与不同比例沼液替代化肥处理无明显相关性。

3 讨论

施用沼液对稻田土壤节肢动物群落有显著影响。与S0(沼液替代化肥比例为0)相比,S1、S2、S3处理土壤节肢动物密度均明显增加(图1),其中S2处理(沼液替代化肥比例66%)较S0处理达显

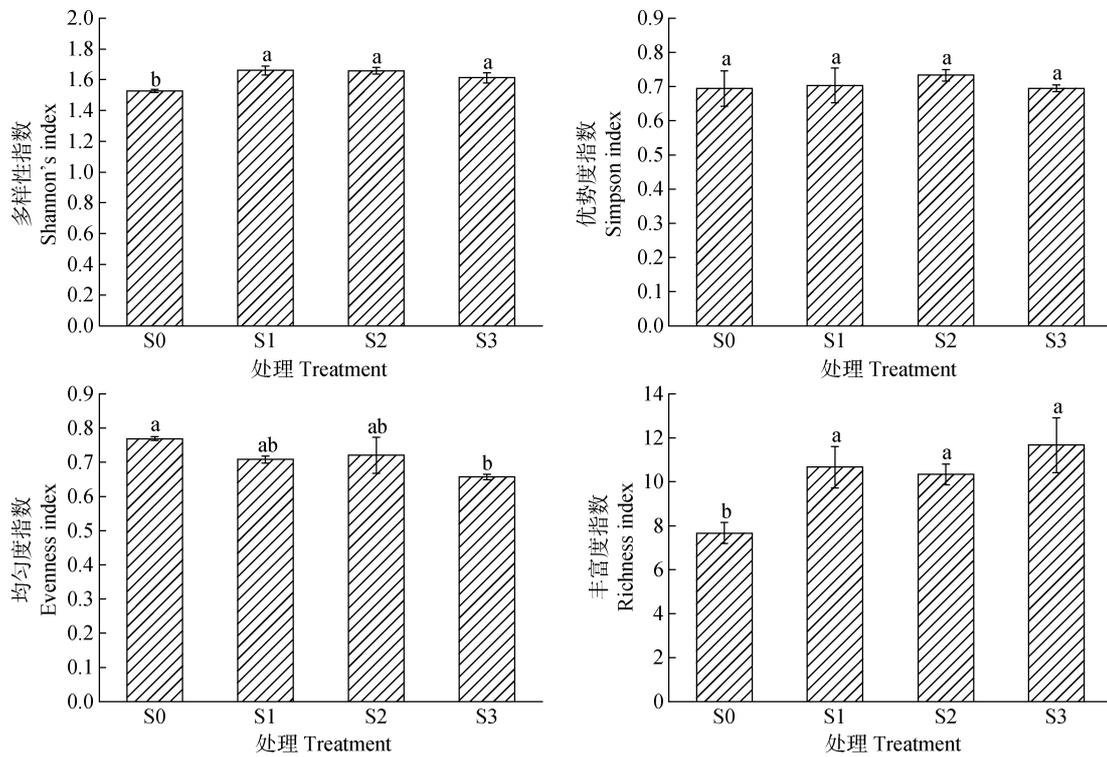


图 2 沼液替代化肥处理下的土壤节肢动物多样性指数、优势度指数、均匀度指数和丰富度指数

Fig. 2 The effect of biogas slurry instead of chemical fertilizer treatment on soil arthropod Shannon-Wiener index, Simpson index, Evenness index and Richness index

表 4 土壤节肢动物密度、多样性指标和主要类群与土壤理化性质相关性分析

Table 4 Correlation between main groups of soil arthropod and soil chemical properties under different treatments

变量 Variables	SOC	TN	TP	TK	C/N	pH	EC
密度 Density	0.42	0.58*	0.33	-0.35	-0.04	0.34	0.05
多样性指数 Shannon's index	0.46	0.26	0.24	0.21	0.04	0.40	-0.21
优势度指数 Simpson index	0.06	-0.22	-0.42	-0.18	-0.15	-0.08	-0.61*
均匀度指数 Evenness index	0.21	-0.45	-0.51	-0.05	0.32	-0.54	-0.10
丰富度指数 Richness index	0.03	0.28	0.38	0.056	-0.21	0.63*	-0.02
前气门亚目 Prostigmata	0.11	0.45	0.13	-0.39	-0.33	0.41	-0.13
甲螨亚目 Oribatida	-0.01	0.38	-0.20	-0.31	-0.34	0.29	0.23
弹尾纲 Collembola	0.60*	0.55	0.41	-0.45	-0.10	0.33	-0.67*
双尾纲 Diplura	0.64*	0.58*	0.52	-0.36	-0.10	0.27	-0.39
蜚蠊目 Blattodea	0.13	-0.05	0.58	-0.22	0.14	-0.15	-0.32

*, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$.

著水平 ($P < 0.05$), 其差异主要是由优势类群弹尾纲密度的变化引起的, 弹尾纲在 S2 处理下密度最高。这与以往研究有所不同, Platen 和 Glemnitz^[27] 研究表明, 弹尾目个体数量在 100%沼液处理下的占

比最高。这可能与沼液性状及土壤类型方面的差异有关。不同沼液替代化肥处理下还出现一些稀有类群, 如 S1 处理下的石蛎目、S2 处理的缨翅目、S3 处理的直翅目、S0 处理的啮目 (表 3)。由于稀有类

- Natural Sciences Edition, 2018, 42 (5): 179—184. [李媛媛, 许子乾, 徐涵涓, 等. 施肥对陆地生态系统土壤动物影响的研究述评[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2018, 42 (5): 179—184.]
- [8] Tabaglio V, Gavazzi C, Menta C. Physico-chemical indicators and microarthropod communities as influenced by no-till, conventional tillage and nitrogen fertilisation after four years of continuous maize[J]. Soil & Tillage Research, 2009, 105 (1): 135—142.
- [9] Sun F, Tariq A, Chen H, et al. Effect of nitrogen and phosphorus application on agricultural soil food webs[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2017, 63 (8): 1176—1186.
- [10] Wang S J, Tan Y, Fan H, et al. Responses of soil microarthropods to inorganic and organic fertilizers in a poplar plantation in a coastal area of Eastern China[J]. Applied Soil Ecology, 2015, 89: 69—75.
- [11] Zhu X Y, Zhu B. Diversity and abundance of soil fauna as influenced by long-term fertilization in cropland of purple soil, China[J]. Soil & Tillage Research, 2015, 146: 39—46.
- [12] Tang Y F, Wang L Y, Carswell A, et al. Fate and transfer of heavy metals following repeated biogas slurry application in a rice-wheat crop rotation[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 270: 110938.
- [13] Chen G, Zhao G H, Zhang H M, et al. Biogas slurry use as N fertilizer for two-season *Zizania aquatica* Turcz. in China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2017, 107 (3): 303—320.
- [14] Dahiya A K, Vasudevan P. Biogas plant slurry as an alternative to chemical fertilizers[J]. Biomass, 1986, 9 (1): 67—74.
- [15] Zheng X B, Fan J B, Cui J, et al. Effects of biogas slurry application on peanut yield, soil nutrients, carbon storage, and microbial activity in an Ultisol soil in Southern China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2016, 16 (2): 449—460.
- [16] Hu L, Tang J, Wu D F, et al. Effects of short-term combined application of biogas slurry and chemical fertilizers on aggregate characteristics of Shajiang black soil[J]. Journal of Henan Institute of Science and Technology: Natural Science Edition, 2021, 49(3): 6—13. [胡林, 唐蛟, 吴大付, 等. 短期沼液化肥配施对砂姜黑土团聚体特征的影响[J]. 河南科技学院学报: 自然科学版, 2021, 49 (3): 6—13.]
- [17] Wentzel S, Schmidt R, Piepho H P, et al. Response of soil fertility indices to long-term application of biogas and raw slurry under organic farming[J]. Applied Soil Ecology, 2015, 96: 99—107.
- [18] Wu J C, Pan X Y, Yang Y H, et al. Effects of long-term application of biogas slurry on soil nutrient content and enzyme activity[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2021, 50 (7): 76—86. [武继承, 潘晓莹, 杨永辉, 等. 长期施用沼液对土壤养分含量和酶活性的影响[J]. 河南农业科学, 2021, 50 (7): 76—86.]
- [19] Wang W, Zhou J N, Tang Y F, et al. Effects of combined application of biogas slurry and straw on the migration and fractions of soil heavy metals in rice-wheat rotation system in coastal reclamation areas[J]. Environmental Science, 2021, 42 (4): 1979—1988. [王伟, 周珺楠, 汤逸帆, 等. 沼液秸秆联用对滨海围垦田土壤重金属迁移及形态变化的影响[J]. 环境科学, 2021, 42 (4): 1979—1988.]
- [20] Koblenz B, Tischer S, Rücknagel J, et al. Influence of biogas digestate on density, biomass and community composition of earthworms[J]. Industrial Crops and Products, 2015, 66: 206—209.
- [21] Pommeresche R, Løes A K, Torp T. Effects of animal manure application on springtails (Collembola) in perennial ley[J]. Applied Soil Ecology, 2017, 110: 137—145.
- [22] Zhang C G, Zhang Y F, Lin H T, et al. The effects of biogas slurry on continuous cropping obstacle factors in green-shed[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33 (2): 117—120. [张昌爱, 张玉凤, 林海涛, 等. 沼液漫灌对设施土壤连作障碍因子的影响[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33 (2): 117—120.]
- [23] Cao L, Tang Q, Guo Y H, et al. Effect of biogas slurry application on small- and medium-sized arthropods communities in coastal reclaimed wheat fields[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42 (2): 646—655. [曹蕾, 唐琪, 郭俨辉, 等. 沼液施用对海岸带围垦麦田土壤中小型节肢动物群落的影响[J]. 生态学报, 2022, 42 (2): 646—655.]
- [24] Yin W Y. Pictorial keys to soil animals of China[M]. Beijing: Science Press, 1998. [尹文英. 中国土壤动物检索图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 1998.]
- [25] Zheng L Y, Gui H. Insect classification[M]. Nanjing: Nanjing Normal University Press, 1999. [郑乐怡, 归鸿. 昆虫分类[M]. 南京: 南京师范大学出版社, 1999.]
- [26] González G, Seastedt T R. Comparison of the abundance and composition of litter fauna in tropical and subalpine forests[J]. Pedobiologia, 2000, 44 (5): 545—555.
- [27] Platen R, Glemnitz M. Does digestate from biogas production benefit to the numbers of springtails (Insecta: Collembola) and mites (Arachnida: Acari) ? [J]. Industrial Crops and Products, 2016, 85: 74—83.
- [28] Niyungeko C, Liang X Q, Liu C L, et al. Effect of biogas slurry application on soil nutrients, phosphomonoesterase activities, and phosphorus species distribution[J]. Journal of Soils and Sediments, 2020, 20 (2): 900—910.
- [29] Lu P, Xu Y P, Tan F, et al. Relationship between cropland soil arthropods community and soil properties in black

- soil area[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46 (9): 1848—1856. [卢萍, 徐演鹏, 谭飞, 等. 黑土区农田土壤节肢动物群落与土壤理化性质的关系[J]. *中国农业科学*, 2013, 46 (9): 1848—1856.]
- [30] Li X H, Liu S R, Wei X, et al. Soil microarthropod diversity in six subtropical forest plantations[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40 (5): 1458—1468. [李小涵, 刘世荣, 魏雪, 等. 南亚热带 6 种人工林小型土壤节肢动物群落多样性[J]. *生态学杂志*, 2021, 40 (5): 1458—1468.]
- [31] Qiu Y, Wu P F, Wei X. Differences among three artificial grasslands in dynamics and community diversity of soil microarthropods[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29 (5): 21—32. [邱月, 吴鹏飞, 魏雪. 三种人工草地小型土壤节肢动物群落多样性动态及其差异[J]. *草业学报*, 2020, 29 (5): 21—32.]
- [32] Guo X J, He X S, Zhang H, et al. Characterization of dissolved organic matter extracted from fermentation effluent of swine manure slurry using spectroscopic techniques and parallel factor analysis (PARAFAC) [J]. *Microchemical Journal*, 2012, 102: 115—122.
- [33] Liang F H, Yang W J, Xu L, et al. Closing extra CO₂ into plants for simultaneous CO₂ fixation, drought stress alleviation and nutrient absorption enhancement[J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2020, 42: 101319.

(责任编辑: 卢 萍)