

DOI: 10.5846/stxb202012033088

曹蕾,唐琪,郭俨辉,汤逸帆,韩建刚,朱咏莉.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.生态学报,2022,42(2):646-655.

Cao L, Tang Q, Guo Y H, Tang Y F, Han J G, Zhu Y L. Effect of biogas slurry application on small- and medium-sized arthropods communities in coastal reclaimed wheat fields. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(2): 646-655.

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

曹 蕾¹, 唐 琪¹, 郭俨辉^{1,3}, 汤逸帆^{1,2}, 韩建刚^{1,2,3}, 朱咏莉^{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 江苏洪泽湖湿地生态系统国家定位观测研究站, 洪泽 223100

摘要:土壤节肢动物群落结构是反映土壤动物多样性及土壤质量的重要指标。沼液施用对土壤结构与肥力的改变,可能对土壤节肢动物群落的特征产生显著影响。以江苏东台海岸带连续施用沼液 5 年的围垦麦田为例,研究沼液不同用量(0、100、200、300 m³/hm²)及沼液替代(0%、33%、66%、100%)化肥对土壤中小型节肢动物群落结构的影响。结果表明:各施肥管理下麦田土壤中小型节肢动物的优势类群均为前气门亚目、甲螨亚目和弹尾目,平均分别占总捕获量的 52.09%—53.33%、22.42%—23.86%和 13.14%—16.51%。当沼液用量从 0 增加到 300 m³/hm²时,土壤动物密度增加了 94%,类群数增加约 2 个,优势度指数增加 9.4% ($P < 0.05$)。沼液 66%替代化肥时,土壤动物密度、类群数和优势度指数最高。因此,施用沼液显著增加了土壤中小型节肢动物的密度、类群数与优势度指数。当沼液替代化肥的比例为 66%时,促进效应最佳。主成分分析表明,无论单施沼液还是沼液替代化肥,弹尾目、前气门亚目与甲螨亚目的响应最为敏感,可将其作为土壤中小型节肢动物对施肥响应的指示指标。

关键词:沼液;土壤节肢动物;沼液替代化肥;麦田;群落结构

Effect of biogas slurry application on small- and medium-sized arthropods communities in coastal reclaimed wheat fields

CAO Lei¹, TANG Qi¹, GUO Yanhui^{1,3}, TANG Yifan^{1,2}, HAN Jiangang^{1,2,3}, ZHU Yongli^{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 National Positioning Observation Station of Hung-tse Lake Wetland Ecosystem in Jiangsu Province, Hongze 223100, China

Abstract: The high dependence on chemical fertilizers driven by crop yields has posed huge risks and challenges to soil quality and ecosystem balance for decades. The reduction and substitution of chemical fertilizers has now become a national strategy for high-quality agricultural development. The organic matter of livestock and poultry manure is converted into methane under highly anaerobic conditions, and the liquid by-products (biogas slurry) and solid residues (biogas residue) are also produced. The biogas slurry is rich in nitrogen, amino acids, and various mineral nutrient elements, being an efficient alternative to chemical fertilizers. Previous studies on the application of biogas slurry mainly focused on the effects of dosage and usage on crop yield and soil properties. The impact on soil fauna communities was insufficient yet. Soil arthropods participate in soil biochemical cycles, stimulating the metabolism of fungi and bacteria and maintaining the

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0505803);江苏省高校优势学科建设工程项目(PAPD)

收稿日期:2020-12-03; **网络出版日期:**2021-09-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lyly1262011@126.com

balance of the soil ecosystem. Due to their sensitive response to habitat changes, soil arthropods are used as important indicators to reflect soil health and stability. However, there is no investigation on the changes of soil arthropod communities under the condition of biogas slurry instead of chemical fertilizers. In the present study, the effects of different dosage of biogas slurry (0, 100, 200, and 300 m³/hm²) and substitution of biogas slurry (0%, 33%, 66%, and 100%) to chemical fertilizers on soil small- and medium-sized arthropod communities were investigated in coastal reclaimed wheat fields with repeated application of biogas slurry for 5 years in Dongtai city, Jiangsu, China. The results showed that the predominant soil fauna groups in wheat field were *Prostigmata*, *Oribatida* and *Collembola*, accounting for 52.09%—53.33%, 22.42%—23.86% and 13.14%—16.51% of the total catches, respectively. When the amount of biogas slurry increased from 0 to 300 m³/hm², the density of soil fauna increased by 94%, the number of groups increased by about 2, and the dominance index increased by 9.4% ($P<0.05$). The density of soil fauna, number of groups and dominance index arrived the highest when using 66% of biogas slurry to replace chemical fertilizers. Therefore, the application of biogas slurry could significantly increase the density, group number, and dominance index of small- and medium-sized arthropods in the soil. When the ratio of biogas slurry to replace chemical fertilizer was 66%, the promotion effect was the best. In addition, principal component analysis showed that *Collembola*, *Prostigmata* and *Oribatida* were much sensitive to biogas slurry application alone or biogas slurry in place of chemical fertilizers. They could be used as indicators of the response of soil small- and medium-sized arthropods to fertilization.

Key Words: biogas slurry; soil arthropods; biogas slurry replaces chemical fertilizer; wheat field; community structure

作物高产驱动下对化学肥料的高度依赖使土壤质量与生态系统平衡面临巨大风险与挑战。土壤动物是土壤生态系统最重要的组成部分,参与土壤生物化学循环,刺激真菌和细菌的新陈代谢,维持着土壤生态系统的平衡^[1-2]。土壤节肢动物群落对生境变化具有较为敏感响应,是反映土壤生态系统健康与稳定的重要指标^[3-4]。研究发现,长期施用化肥减少了土壤中小型动物丰度和多度^[5-8],抑制了土壤动物的繁殖甚至导致其死亡^[6]。例如,长期单独施用氮肥会减少无脊椎动物的数量^[9],但有机肥的施用能够增加小型土壤动物的数量、密度和多样性^[10-12],以及群落的成熟度指数^[13]。相比较而言,有机肥配施化肥有利于土壤动物群落多样性和丰富度的提高^[7, 14]。沼液是畜禽粪污等有机物充分厌氧发酵后残留的液态副产物,富含氮素、氨基酸和各种矿质营养元素^[15],是当前替代化肥的首选。以往有关沼液施用的研究主要集中在不同施用量或施用方式对作物产量^[16-17]、品质^[18-19],土壤性状及重金属含量^[20-24]等的影响方面,对土壤动物群落的影响还很不充分。特别是,有关沼液替代化肥模式下土壤节肢动物群落的变化研究还未见报道。

我国东部沿海的滨海盐土约有 2.3×10^6 hm²^[25],这些土壤经过改良已成为我国当前最重要的粮食安全保障基地^[26]。同时,由于滨海地区土地成本低,远离人群,大量规模化养殖企业分布在此区域^[27],产生的沼液主要在当地农田消纳。因此,本研究在江苏东台进行了连续施用沼液 5 年的试验的基础上,通过设置沼液不同用量(0、100、200、300 m³/hm²)及不同比例(0%、33%、66%、100%)替代化肥的田间小区试验,研究土壤中小型节肢动物数量、密度、群落结构等的变化,为海岸带围垦田沼液施用及替代化肥对土壤动物群落影响提供研究数据。

1 材料与方法

1.1 区域概况

研究试验位于江苏省盐城东台市弶港镇(32°38'25"N, 120°54'17"E),区域属于亚热带和暖温带过渡区,年均气温 14.4℃,降水量 1060 mm,日照时间 2221 h,四季分明,雨量多集中在夏季,夏热冬冷。土壤质地为粉砂质壤土。小麦种植周期为每年的 11 月上旬—次年 6 月上旬,种植品种为扬麦 16 号。土壤基本理化性质如表 1 所示。

表 1 土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical soil properties

总有机碳 TOC Total organic carbon/ (g/kg)	全氮 TN Total nitrogen/ (g/kg)	全磷 TP Total phosphorus/ (g/kg)	全钾 TK Total potassium/ (g/kg)	pH	电导率 EC Electrical conductivity/ ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	颗粒组成 Particle composition/%		
						砂粒	粉粒	黏粒
4.58	0.48	0.60	16.92	8.28	102.23	36.20	56.70	7.10

1.2 沼液性状

沼液选自中粮家佳康(江苏)有限公司黄海猪场沼气工程站。猪场粪污经水泡粪工艺收集,通过匀浆池后进入发酵罐,36—38℃下全混合厌氧反应器(CSTR)发酵 15 d。液体进入存贮池并稳定 1—2 个月,底部为沼渣,中上部为沼液。沼液的基本理化性状如表 2 所示。

表 2 沼液理化性质(平均值±标准差) $n=3$

Table 2 Physical and chemical properties of biogas slurry (Mean±SD)

总有机碳 TOC Total organic carbon/ (g/L)	铵态氮 NH_4^+-N Ammonium nitrogen/ (g/L)	硝态氮 NO_3^--N Nitrate nitrogen/ (mg/L)	全氮 TN Total nitrogen/ (g/L)	pH	电导率 EC Electrical conductivity/ ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	锌 Zn/ (mg/L)	铜 Cu/ (mg/L)
1.43±0.31	1.01±0.03	33.11±4.25	1.50±0.48	7.83±0.04	10.20±2.03	10.32±2.74	2.91±0.62

1.3 试验设计

田间小区建于 2015 年,共设 2 组实验。

试验组①:设置 0、100、200、300 m^3/hm^2 共 4 个沼液施用量处理(称为 B 处理:分别编号 B0、B1、B2、B3,折合氮肥分别为 0、150、300、450 kg/hm^2),其中 150 kg/hm^2 为当地推荐沼液施用量。

试验组②:施加沼液中折合的氮与补施化肥氮的总量控制为 150 kg/hm^2 ,设置沼液替代化肥比例分别为 0%、33%、66%、100% 共 4 个处理(称为 S 处理:分别编号 S0、S1、S2、S3)。

每个处理设 3 个重复(小区),共 21 个小区(其中,B1 与 S3 相同),小区面积为 6 m×10 m,各小区间隔 50 cm,底部和间隔带均做防渗处理。分别于 10 月下旬施加基肥,次年 1 月施加追肥,基肥与追肥的比例为 1:1,田间管理与当地大田一致。各小区施肥用量如表 3 所示。

表 3 各试验小区施肥量

Table 3 The fertilizer amount applied in each plot

处理 Treatment		沼液 Biogas slurry/ (m^3/hm^2)	尿素 Urea/ (kg/hm^2)	折合氮肥 Nitrogen equivalent/ (kg/hm^2)
沼液用量(B) Biogas slurry dosage	B0	0	0	0
	B1	100	0	150
	B2	200	0	300
	B3	300	0	450
沼液替代化肥(S) Biogas slurry instead of chemical fertilizer	S0	0	323	150
	S1	36	215	150
	S2	71	108	150
	S3	100	0	150

1.4 样品采集

分别在小麦苗期(2019 年 12 月)和小麦收获期(2020 年 6 月)采集土壤样品。每个处理按 S 形布点,采集 5 个样点。采样时,小心去除凋落物层,用直径为 4 cm 的取土器分 0—10 cm 和 10—20 cm 两个层次采集

土壤样品。同一小区的相同土层土壤充分混匀形成一个混合样品,装入封口袋中密封装箱,尽量减少对土壤动物的扰动,48 小时内带回实验室进行分析。

1.5 土壤中小型节肢动物的分离、鉴别与群落分析

采用 Tullgren 法收集土壤中的中小型节肢动物样品,分离时间为 48 h,分离出的土壤动物标本保存于 75%乙醇溶液中。采用生物显微镜(ECLIPSE E200MV,南京尼康江南光学仪器有限公司)对分离出来的土壤动物进行鉴定并统计数量。依据尹文英的《中国土壤动物检索图鉴》^[28]进行土壤动物鉴别。幼虫和成虫归到同一类别。

根据土壤动物个体数量进行分类,个体数量占群落总个体数 10.00%以上者为优势类群(+++),占 1.00%—10.00%者为常见类群(++),<1.00%者为稀有类群(+).

土壤动物群落多样性分析包括:Simpson 优势度指数(C)、Shannon-Wiener 多样性指数(H)、Pielou 均匀度指数(J)。计算公式如式(1)—(3):

$$C = \sum P_i^2 \quad (1)$$

$$H = - \sum (P_i \ln P_i) \quad (2)$$

$$J = H / \ln S \quad (3)$$

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。

1.6 数据处理与分析

土壤动物密度数据均为分离的土壤动物个体数量换算成的平均密度(个/ m^2)。数据分析前,对不服从正态分布数据进行 $\log(X+1)$ 转换,采用 IBM SPSS Statistics 25.0 软件进行方差分析(one-way ANOVA),并用邓肯(Duncan)法对不同处理之间进行差异显著性检验($P < 0.05$)。而对于不服从正态分布的土壤动物数据,则采用 Kruskal Wallis Test(H) 非参数检验进行数据分析。采用主成分分析(Principal component analysis PCA)分析不同施肥处理对主要类群土壤动物密度的影响,应用 R 4.0.1(R Core Team 2020)软件中的“vegan”包进行土壤动物群落多样性分析运算,并用 OriginPro 9.0 软件作图。图表中涉及土壤动物密度及群落多样性指数数据均为平均值 \pm 标准误。不同小写字母表示同一类群不同施肥处理间的差异显著($P < 0.05$)。

2 结果

2.1 沼液用量对土壤中小型节肢动物群落组成及多样性的影响

对不同沼液用量(B)处理两个时期(小麦苗期和收获期)0—20 cm 土层相关数据综合统计,共捕获土壤动物 1275 只,隶属于 9 纲 23 个类群(目)(表 4),从表中可以看出,B 处理的优势类群为前气门亚目 Prostigmata、甲螨亚目 Oribatida 和弹尾目 Collembola,分别占总密度的 52.09%、22.20%和 16.51%;常见类群为:双尾目 Diplura(4.24%)、蜚蠊目 Blattodea(1.96%)。对优势类群密度的分析表明(图 1),优势目的密度随沼液施用量的增加呈现升高的趋势,且 B0 处理(沼液施用量为 $0 \text{ m}^3/\text{hm}^2$)前气门亚目和甲螨亚目的密度均显著低于其他处理($P < 0.05$),B3 处理(沼液施用量为 $300 \text{ m}^3/\text{hm}^2$),前气门亚目和甲螨亚目密度则均显著高于其他处理($P < 0.05$);但不同处理间弹尾目密度的差异未达到显著水平($P > 0.05$)。

不同沼液用量处理间土壤动物总类群数有明显差异,以 B0 最少(约 10 个类群),其次是 B2 和 B3 处理,B1 最高,类群数约达到了 14 个(表 5)。等足目 Isopoda、倍足目 Diplopoda、革翅目 Dermaptera、鳞翅目 Lepidoptera 未出现在沼液施用量较高的处理中(B2、B3)。总体来看,随沼液用量的增加,土壤中小型节肢动物总密度随之增加,不同处理间表现为 $B3 > B2 > B1 > B0$ 。

不同沼液用量处理土壤中小型节肢动物总密度同时受采样时期及土层的显著影响。由图 2 可见,苗期不同沼液用量处理间无显著性差异,而收获期 B3 显著高于其他处理($P < 0.05$)。总体而言,小麦苗期土壤中小型节肢动物总密度均显著低于收获期;且无论 0—10 cm 或 10—20 cm 土层,不同沼液用量间的动物密度均表现为高施用量处理大于低施用量处理,但处理间总体差异不显著($P > 0.05$)(图 3)。从图 3 中也可以看出,土

壤中小型节肢动物表现出明显的表聚性,各处理 0—10 cm 土层的密度均高于 10—20 cm 土层。统计发现,各处理 0—10 cm 土层中小型节肢动物数量占总数量平均达到了 55.96%—66.19%。表 5 可见,随沼液施用量的增加,其多样性指数、优势度指数均呈升高趋势;但不同处理间多样性指数无显著差异($P>0.05$),优势度指数则表现为除了 B0 与 B3 间差异显著外,其他处理间均不显著。均匀度指数表现为 B1 显著低于其他 3 个处理($P<0.05$)。

表 4 不同沼液用量及替代化肥处理的土壤动物群落组成及密度/(个/m²)
Table 4 Compositions of soil fauna community under different fertilization treatments

类群 Group	沼液用量 Biogas slurry dosage				沼液替代化肥 Biogas slurry instead of chemical fertilize				总数 Total
	B0	B1	B2	B3	S0	S1	S2	S3	
裂盾目 Schizomida	-	23.15(+)	-	231.48(++)	92.59(++)	46.30(+)	46.30(+)	23.15(+)	439.82(+)
蜘蛛目 Araneae	46.30(+)	92.59(+)	370.37(++)	46.30(+)	92.59(++)	92.59(+)	185.19(++)	92.59(+)	925.93(+)
前气门亚目 Prostigmata	3842.59(+++)	7962.96(+++)	9166.67(+++)	9768.52(+++)	3842.59(+++)	7962.96(+++)	9768.52(+++)	7962.96(+++)	52314.81(+++)
甲螨亚目 Oribatida	1666.67(+++)	3888.89(+++)	3333.33(+++)	4212.96(+++)	1666.67(+++)	3888.89(+++)	3333.33(+++)	3888.89(+++)	21990.74(+++)
桡足纲 Copepoda	-	69.44(+)	-	138.89(+)	-	-	-	69.44(+)	208.33(+)
等足目 Isopoda	-	23.15(+)	-	-	46.30(+)	-	-	23.15(+)	69.45(+)
倍足目 Diplopoda	92.59(+)	23.15(+)	-	-	-	-	-	23.15(+)	115.74(+)
综合纲 Symphyla	-	69.44(+)	92.59(+)	138.89(+)	-	46.30(+)	-	69.44(+)	347.22(+)
蠍蟥纲 Pauropoda	185.19(++)	92.59(+)	92.59(+)	185.19(+)	46.30(+)	92.59(+)	-	92.59(+)	694.45(+)
弹尾目 Collembola	2129.63(+++)	2013.89(+++)	2129.63(+++)	3472.22(+++)	648.15(++)	1527.78(++)	972.22(++)	2013.89(+++)	12893.52(+++)
双尾目 Diplura	324.07(++)	648.15(++)	648.15(++)	879.63(++)	138.89(++)	601.85(++)	462.96(++)	648.15(++)	3703.70(++)
石蛎目 Microcoryphia	-	-	46.30(+)	46.30(+)	-	-	-	-	92.60(+)
蜚蠊目 Blattoptera	138.89(++)	231.48(++)	416.67(++)	370.37(++)	277.78(++)	324.07(++)	462.96(++)	231.48(++)	2222.22(++)
等翅目 Isoptera	185.19(++)	138.89(+)	-	138.89(+)	231.48(++)	138.89(+)	185.19(++)	138.89(+)	1018.53(++)
直翅目 Orthoptera	138.89(++)	115.74(+)	138.89(+)	138.89(+)	46.30(+)	46.30(+)	138.89(+)	115.74(+)	763.90(+)
革翅目 Dermaptera	46.30(+)	-	-	-	-	23.15(+)	69.44(+)	-	138.89(+)
半翅目 Hemiptera	92.59(+)	74.07(+)	46.30(+)	92.59(+)	13.89(+)	46.30(+)	46.30(+)	74.07(+)	412.04(+)
啮虫目 Psocoptera	46.30(+)	71.76(+)	92.59(+)	185.19(+)	143.52(++)	120.37(+)	162.04(++)	71.76(+)	821.77(+)
缨翅目 Thysanoptera	-	50.93(+)	46.30(+)	46.30(+)	55.56(+)	27.78(+)	46.30(+)	50.93(+)	273.17(+)
鳞翅目 Lepidoptera	-	23.15(+)	-	-	92.59(++)	-	92.59(+)	23.15(+)	208.33(+)
鞘翅目 Coleoptera	46.30(+)	115.74(+)	46.30(+)	46.30(+)	185.19(++)	185.19(++)	46.30(+)	115.74(+)	671.32(+)
双翅目 Diptera	92.59(+)	23.15(+)	138.89(+)	46.30(+)	46.30(+)	46.30(+)	-	23.15(+)	393.53(+)
膜翅目 Hymenoptera	-	-	92.59(+)	-	46.30(+)	92.59(+)	46.30(+)	-	277.78(+)
总数 Total	9074.07	15752.31	16898.15	20185.19	7712.96	15310.19	16064.81	15752.31	100997.70

表 5 不同沼液用量(B)处理土壤动物群落的多样性特征
Table 5 Diversity characteristics of soil fauna community treated with different biogas slurry treatments (B)

处理 Treatment	多样性指数 Shannon-Wiener index	优势度指数 Simpson index	均匀度指数 Pielou index	总类群数 Group number
B0	1.44±0.12a	0.64±0.02b	0.62±0.03a	10.00±1.73b
B1	1.47±0.10a	0.67±0.01ab	0.55±0.01b	13.67±1.53a
B2	1.51±0.14a	0.68±0.04ab	0.63±0.03a	11.67±1.15ab
B3	1.52±0.14a	0.70±0.02a	0.61±0.03a	12.07±1.53ab

小写字母表示同一多样性特征不同处理间的差异($P<0.05$)

2.2 沼液替代化肥对土壤中小型节肢动物群落组成及多样性的影响

对沼液替代化肥(S)处理两个时期(小麦苗期和收获期)0—20 cm 土层相关数据综合统计,共捕获土壤动物 1152 只,隶属于 9 纲 22 个类群(目)(表 4)。S 处理的优势类群同 B 处理一致,均为前气门亚目、甲螨亚目和弹尾目,分别占总密度的 55.28%、23.86%和 10.38%;常见类群为:双尾目(3.17%)、蜚蠊目(2.33%)和等

翅目 *Isoptera* (1.30%)。图 4 表明, S1、S2 和 S3 处理的优势类群密度均显著高于纯化肥处理 (S0) ($P < 0.05$); 当沼液替代 66% 化肥 (S2) 时, 前气门亚目密度最高; 纯沼液处理 (S3) 时, 弹尾目密度显著高于其他处理 ($P < 0.05$)。

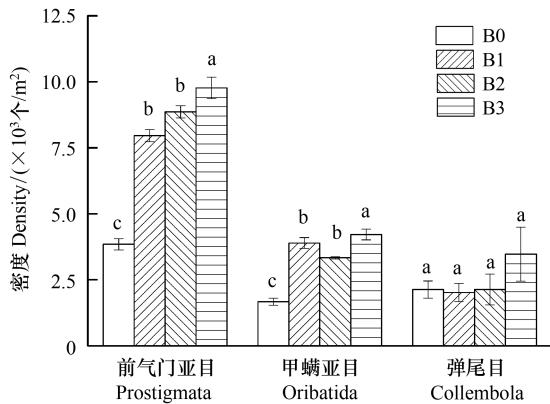


图 1 不同沼液用量(B)处理对土壤动物优势类群密度的影响

Fig.1 Different dosage of biogas slurry (B) treatment of soil fauna dominant density

B 处理: 不同沼液用量处理; B0: 沼液用量 $0 \text{ m}^3/\text{hm}^2$; B1: 沼液用量 $100 \text{ m}^3/\text{hm}^2$; B2: 沼液用量 $200 \text{ m}^3/\text{hm}^2$; B3: 沼液用量 $300 \text{ m}^3/\text{hm}^2$

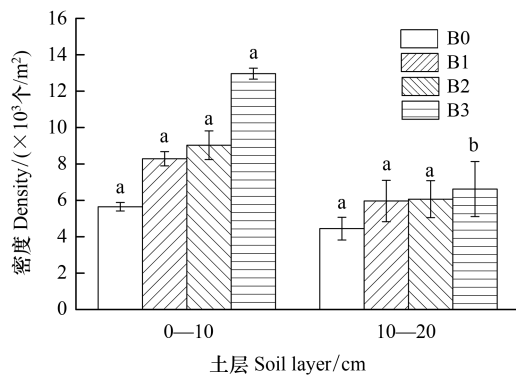


图 3 不同沼液用量(B)处理 0—10 cm 与 10—20 cm 土层中小型动物密度比较

Fig.3 Different dosage of biogas slurry (B) 0—10 cm and 10—20 cm soil layer of soil fauna density (seedling and harvest)

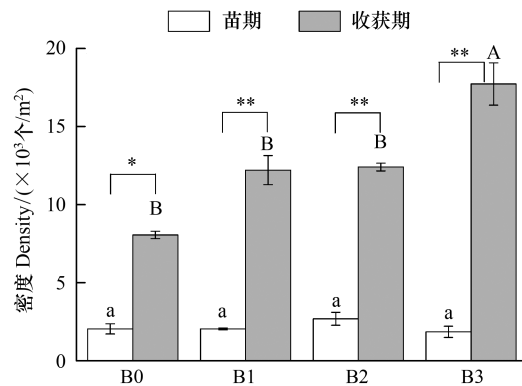


图 2 不同沼液用量(B)处理苗期和收获期土壤中小型动物总密度差异

Fig.2 Different dosage of biogas slurry (B) processing seedling and harvest soil fauna density difference

小写字母表示苗期不同处理间的差异, 大写字母表示收获期不同处理间的差异 ($P < 0.05$); 相同处理间苗期与收获期: * 表示差异显著 ($P < 0.05$), ** 表示差异极显著 ($P < 0.01$)

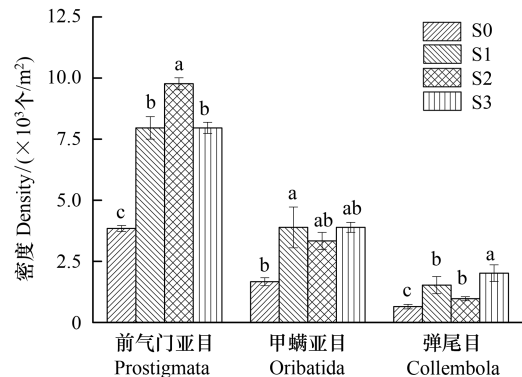


图 4 沼液替代化肥(S)处理对土壤中小型节肢动物优势类群密度的影响

Fig.4 Biogas slurry instead of chemical fertilizer (S) treatment of soil fauna dominant density

S 处理: 不同沼液替代化肥比例; 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%

不同沼液替代化肥处理间分布的土壤动物类群有明显差异, 以 S0 最少 (约 11 个类群), 其次是 S1 和 S2 处理, S3 最高, 类群数约达到了 14 个 (表 6)。倍足目、桡足纲 *Copepoda*、石蛎目 *Microcoryphia* 未出现在含化肥 (S0、S1 和 S2) 的处理中。由此可见, S0 处理土壤动物密度最少, S3 次之, 沼液化肥配施处理土壤动物密度高于纯化肥和纯沼液处理; 密度排序为 $S2 > S1 > S3 > S0$ 。

由图 5 可见, 各处理小麦苗期土壤中小型节肢动物总密度均显著低于收获期。土壤中小型节肢动物表聚性也较明显 (图 6), 各处理 0—10 cm 土层的密度平均达到 $7673.03 \text{ 个}/\text{m}^2$, 比 10—20 cm 土层平均高 17.2%。

但只有 S2 处理 0—10 cm 和 10—20 cm 间的差异达到显著水平 ($P<0.05$)。此外,沼液替代化肥不同比例处理对土壤中小型节肢动物多样性及均匀度也表现出一定的影响。表 6 可见,土壤动物群落多样性指数、优势度指数和均匀度指数均表现为 $S0>S2>S1$;但不同处理间多样性指数无显著差异,优势度指数则表现为只有 S1 与 S3 间差异显著。均匀度指数表现为 S1 处理显著低于其他 3 个处理 ($P<0.05$)。

表 6 沼液替代化肥(S)处理土壤动物群落的多样性特征

处理 Treatment	多样性指数 Shannon-Wiener index	优势度指数 Simpson index	均匀度指数 Pielou index	总类群数 Group number
S0	1.55±0.10a	0.65±0.03ab	0.61±0.05a	11.33±1.21b
S1	1.49±0.15a	0.62±0.01b	0.50±0.01b	12.57±1.53a
S2	1.54±0.12a	0.64±0.04ab	0.53±0.01a	12.87±1.61a
S3	1.47±0.10a	0.67±0.01a	0.55±0.01a	13.67±1.53a

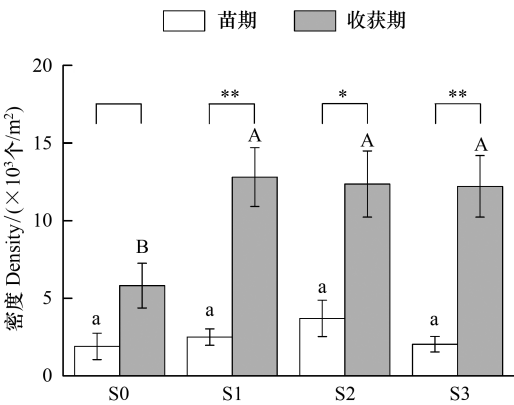


图 5 沼液替代化肥(S)处理苗期和收获期土壤中小型动物总密度差异

Fig.5 Biogas slurry instead of chemical fertilizer (S) treatment processing seedling and harvest soil fauna density difference

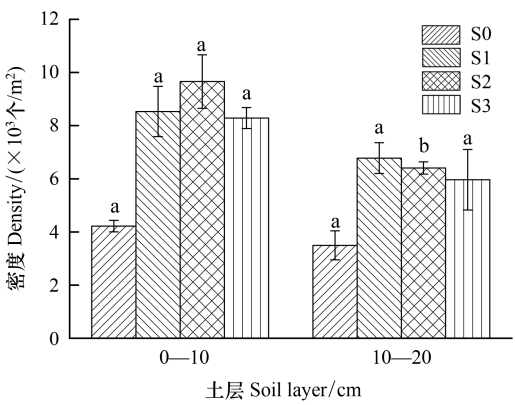


图 6 沼液替代化肥(S)处理 0—10 cm 与 10—20 cm 土层中小型动物密度比较

Fig.6 Biogas slurry instead of chemical fertilizer (S) treatment 0—10 cm and 10—20 cm soil layer of soil fauna density

2.3 土壤中小型节肢动物对沼液不同用量及替代化肥处理的敏感性

为了进一步探讨沼液用量及替代化肥对土壤中小型节肢动物密度及类群变化的影响,以密度占比最高的十个类群(即为:土壤动物主要类群,其密度占总密度的 96.97%)进行变异主成分分析。结果表明(图 7),第一主成分(横轴)和第二主成分(纵轴)共解释了土壤动物主要类群密度变异的 99.6%,其中第一主成分为 98.5%,第二主成分为 1.1%。沼液用量(B0、B1、B2、B3)和沼液替代化肥(S0、S1、S2)聚类区分明显,并且沼液替代化肥控制总氮平衡下的各处理间夹角较小,而沼液用量各处理间夹角较大。单施沼液对弹尾目影响最大,而甲螨亚目和前气门亚目在沼液替代化肥处理中表现敏感。双尾目、蜚蠊目、等翅目、蜘蛛目、啮虫目、直翅目、鞘翅目之间聚类相关性较高,但未受到沼液用量和沼液替代化肥的明显影响。

3 讨论

3.1 沼液用量对土壤中小型节肢动物群落组成及多样性的影响

杨宝玲等在江苏东台林场不同土地利用类型的调查结果表明^[29],优势类群为蜚蠊目和弹尾目。这与本研究在麦田的调查一致,这表明施用沼液(0—300 m³/hm²)不会对土壤动物原有优势类群产生影响。然而,随着沼液施用量增加,不同类群的密度发生显著变化。本研究发现前气门亚目和甲螨亚目密度在沼液施用后

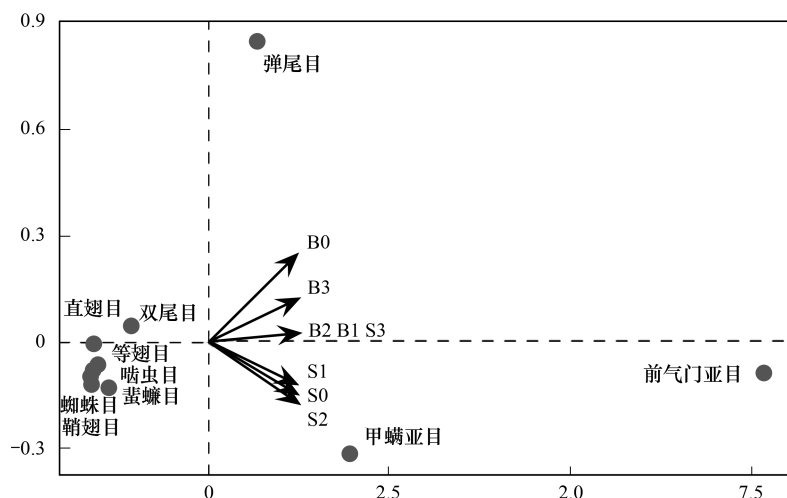


图7 不同施肥处理对土壤动物主要类群变异主成分分析

Fig.7 Principal component analysis (PCA) of soil fauna with the different treatment

增加,例如,甲螨亚目的个体密度在沼液施用后增加了 100%—150%。这与单施沼液下甲螨个体密度随沼液用量的增加而增大的结论相一致^[30]。相比较而言,高用量沼液处理有利于弹尾目密度的增加。这种变化的原因可能是沼液能提高土壤的真菌数量^[31],而弹尾目类群与真菌协同共存^[32—33]。

与不施沼液处理(B0)相比,沼液施用增加了土壤动物群落的总类群数(表4),尤其低施用量(B1)的增加效果更为显著。这可能是由于沼液中含有丰富的氨基酸、有机质等营养^[34],低用量施用后提升了土壤的保持及缓冲能力,提供了合适的微环境,有利于土壤动物的生存和繁衍^[35],提高了多样性指数,对土壤动物群落结构有一定的积极作用。由此可见,施用沼液能使土壤中小型动物密度增加,群落多样性上升。

3.2 沼液替代化肥施用对土壤动物群落组成及多样性的影响

本研究在氮总量保持一致的前提下进行不同比例的沼液替代化肥,研究发现,S2处理较S0处理,三大优势类群前气门亚目、甲螨亚目和弹尾目的密度分别提高了154%、100%和50%,稀有类群半翅目的密度提高了228%。这可能与沼液与化肥配施可以更好的提升土壤养分的有效性有关^[36—37]。有所不同的是,随沼液施用比例的增加一些类群数量的增长受到抑制,例如,S2较S1处理的鞘翅目和膜翅目密度分别降低了75%和50%,但沼液替代比例继续增加为100%(S3)时,甲螨亚目与弹尾目的密度依然继续升高,而前气门亚目的密度却有所下降。孔云等发现有机肥配施化肥提高了中小型土壤动物如蛴螬目、弹尾目的密度^[38];而朱强根等在仅施用有机肥处理的研究中发现前气门亚目与甲螨亚目没有明显影响^[7]。这与本研究结果不完全一致。这可能与本研究施用的沼液与其他有机肥性状不同的原因。

配施处理中沼液的施用显著增加了土壤动物群落的总类群数,并随沼液配比增加而提高,这可能是由于纯化肥对土壤理化性质的影响与沼液不同^[39],从而对土壤动物造成不利影响。然而随沼液配比的增加,各处理土壤动物群落多样性指数、优势度指数与均匀度指数无显著差异。这表明沼液替代化肥对土壤动物群落多样性无显著影响。值得注意的是,纯化肥(S0)处理的土壤动物类群数和土壤动物密度在S处理中均为最低,但均匀度指数却最高。这可能是类群数和密度侧重描述数量关系大小,均匀度指数侧重描述类群间平衡差异,在衡量群落多样性上可能存在差异表现^[7]。

3.3 不同采样时期与土层对土壤中小型节肢动物的分布特征

土壤节肢动物群落动态主要受土壤温度及含水量的变化的影响^[40—41],不同采样时期温度变化较大,冬小麦收获期处于6月,气温与土壤温度均明显高于12月(苗期)。因此,土壤中小型节肢动物的整体密度表现为收获期(2020年6月)显著高于苗期(2019年12月)。并且,不同采样时期土壤动物密度的差异也同时因

施肥处理产生影响。例如,B处理收获期比苗期土壤动物密度增加了295%—857%,S处理收获期比苗期土壤动物密度增加了212%—503%。土壤温度的季节变化是影响土壤动物季节动态的主要因子。此外,不论是沼液施用量处理还是沼液替代化肥处理,均表现出0—10 cm土层中小型动物密度大于10—20 cm土层,呈现明显的表聚现象。这与大多数研究一致^[42—44],原因可能主要与土壤表层营养丰富、通气性好等因素有关。

3.4 土壤中小型节肢动物群落密度的变异特征

土壤动物群落密度可以用来反映不同施肥措施对农田土壤生态环境的影响^[45—46]。本研究不同沼液施用量处理对土壤动物群落的贡献差异主要来源于总氮量的差异,而控制总氮平衡的S处理则表现为沼液与化肥配比的差异。以往研究也表明,农田中小型土壤动物个体数随外源氮施用量升高而递增^[47—48],且各类群土壤动物的响应不尽相同^[8, 49]。从敏感性分析,单施沼液对弹尾目影响最大,而甲螨亚目和前气门亚目在沼液替代化肥处理中表现最为敏感。本研究发现弹尾目、前气门亚目和甲螨亚目的密度对不同施肥措施均表现最为敏感,并与研究区域麦田土壤中小型节肢动物的优势类群具有一致性,可将其作为土壤中小型节肢动物对施肥响应的指示指标。

4 结论

(1)江苏海岸带围垦麦田土壤中小型节肢动物群落组成类群丰富,无论是不同沼液施用量处理还是沼液替代化肥处理,其优势土壤动物类群均为前气门亚目、甲螨亚目和弹尾目,其数量平均分别占总捕获量的52.09%—55.28%、22.20%—23.86%和13.14%—16.51%。

(2)沼液施用增加了土壤中小型节肢动物的总体密度特别是前气门亚目和甲螨亚目等类群密度以及优势度指数。沼液替代33%和66%化肥均提高了土壤动物的密度、类群数和优势度指数,沼液替代66%化肥时,土壤动物密度、类群数和优势度指数最高。

(3)弹尾目、前气门亚目与甲螨亚目分别对沼液不同用量和沼液替代化肥处理响应最为灵敏,可尝试将其作为土壤中小型节肢动物对施肥响应的指示指标。

参考文献 (References):

- [1] Ettema C H, Wardle D A. Spatial soil ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, 2002, 17(4): 177-183.
- [2] Lavelle P, Decaëns T, Aubert M, Barot S, Blouin M, Bureau F, Margerie P, Mora P, Rossi J P. Soil invertebrates and ecosystem services. *European Journal of Soil Biology*, 2006, 42(1): S3-S15.
- [3] 李媛媛,廖家辉,许子乾,徐涵湄,倪娟平,黄石德,阮宏华.有机肥和植被去除管理对人工林土壤节肢动物多样性的影响. *生态学报*, 2021, 41(7): 2761-2769.
- [4] 张蕊,李佳,高梅香.玉米秸秆处理方式对冬季黑土农田蜱螨目和弹尾目群落结构的影响. *生态学报*, 2020, 40(22): 8315-8325.
- [5] Lindberg N, Persson T. Effects of long-term nutrient fertilisation and irrigation on the microarthropod community in a boreal Norway spruce stand. *Forest Ecology and Management*, 2004, 188(1/3): 125-135.
- [6] 李淑梅,樊淑华.施用不同肥料对农田土壤动物群落结构的影响. *河南农业科学*, 2008, (2): 57-59.
- [7] 朱强根,朱安宁,张佳宝,张焕朝,钦绳武,信秀丽.长期施肥对黄淮海平原农田中小型土壤节肢动物的影响. *生态学杂志*, 2010, 29(1): 69-74.
- [8] 林英华,黄庆海,刘骅,彭畅,朱平,张树清,张夫道.长期耕作与长期定位施肥对农田土壤动物群落多样性的影响. *中国农业科学*, 2010, 43(11): 2261-2269.
- [9] Edwards C A, Lofty J R. Nitrogenous fertilizers and earthworm populations in agricultural soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 1982, 14(5): 515-521.
- [10] Filser J. The effect of green manure on the distribution of collembola in a permanent row crop. *Biology and Fertility of Soils*, 1995, 19(4): 303-308.
- [11] Axelsen J A, Kristensen K T. Collembola and mites in plots fertilised with different types of green manure. *Pedobiologia*, 2000, 44(5): 556-566.
- [12] 美丽,红梅,刘鹏飞,赵巴音那木拉,德海山,李志新.有机肥施用对农田中小型土壤动物群落的影响. *中国土壤与肥料*, 2018, (5): 154-162.
- [13] Klaus V H, Kleinebecker T, Prati D, Gossner M M, Alt F, Boch S, Gockel S, Hemp A, Lange M, Müller J, Oelmann Y, Pašalić E, Renner S C, Socher S A, Türke M, Weisser W W, Fischer M, Hölzel N. Does organic grassland farming benefit plant and arthropod diversity at the expense of yield and soil fertility? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 177: 1-9.
- [14] 刘婷,叶成龙,陈小云,冉炜,沈其荣,胡锋,李辉信.不同有机肥源及其与化肥配施对稻田土壤线虫群落结构的影响. *应用生态学报*, 2013, 24(12): 3508-3516.

- [15] Islam R, Rahman S M E, Rahman M, Oh D H, Ra C S. The effects of biogas slurry on the production and quality of maize fodder. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 2010, 34(1): 91-99.
- [16] Du Z J, Chen X M, Qi X B, Li Z Y, Nan J K, Deng J Q. The effects of biochar and hogger biogas slurry on fluvo-aquic soil physical and hydraulic properties: a field study of four consecutive wheat-maize rotations. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(8): 2050-2058.
- [17] Zheng X B, Fan J B, Cui J, Wang Y, Zhou J, Ye M, Sun M M. Effects of biogas slurry application on peanut yield, soil nutrients, carbon storage, and microbial activity in an Ultisol soil in southern China. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(2): 449-460.
- [18] 唐微, 伍钧, 孙百晔, 杨刚, 杨琴. 沼液不同施用量对水稻产量及稻米品质的影响. *农业环境科学学报*, 2010, 29(12): 2268-2273.
- [19] 王亚雄, 常少刚, 王锐, 孙权. 不同有机肥对宁夏枸杞生长、产量及品质的影响. *中国土壤与肥料*, 2019, (5): 91-95.
- [20] 王伟, 周珺楠, 汤逸帆, 申建华, 韩建刚. 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. *环境科学*, 2021, 42(4): 1979-1988.
- [21] 汤逸帆, 汪玲玉, 吴旦, 戴成, 韩建刚. 农田施用沼液的重金属污染评价及承载力估算——以江苏滨海稻麦轮作田为例. *中国环境科学*, 2019, 39(4): 1687-1695.
- [22] 赖星, 伍钧, 王静雯, 徐敏, 孟晓霞, 毛晓月, 李炎. 连续施用沼液对土壤性质的影响及重金属污染风险评价. *水土保持学报*, 2018, 32(6): 359-364, 370-370.
- [23] Insam H, Gómez-Brandón M, Ascher J. Manure-based biogas fermentation residues-Friend or foe of soil fertility? *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 84: 1-14.
- [24] Xiong X, Li Y X, Li W, Lin C Y, Han W, Yang M. Copper content in animal manures and potential risk of soil copper pollution with animal manure use in agriculture. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010, 54(11): 985-990.
- [25] Li J G, Pu L J, Zhu M, Zhang J, Li P, Dai X Q, Xu Y, Liu L L. Evolution of soil properties following reclamation in coastal areas: a review. *Geoderma*, 2014, 226-227: 130-139.
- [26] Sun Y G, Li X Z, Mander Ü, He Y L, Jia Y, Ma Z G, Guo W Y, Xin Z J. Effect of reclamation time and land use on soil properties in Changjiang River Estuary, China. *Chinese Geographical Science*, 2011, 21(4): 403-416.
- [27] Li T X, Han Y W, Li Y Y, Lu Z M, Zhao P. Urgency, development stage and coordination degree analysis to support differentiation management of water pollution emission control and economic development in the eastern coastal area of China. *Ecological Indicators*, 2016, 71: 406-415.
- [28] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社, 1998.
- [29] 杨宝玲, 张文文, 范换, 王邵军, 阮宏华, 沈彩芹, 曹国华. 苏北沿海地区不同土地利用类型下土壤动物群落结构特征. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2017, 41(6): 120-126.
- [30] 龙秋宁, 王润松, 徐涵涓, 曹国华, 沈彩芹, 阮宏华. 沼液与生物炭联合施用对杨树人工林土壤甲螨密度的影响. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2020, 44(3): 211-215.
- [31] Tang Y F, Luo L M, Carswell A, Misselbrook T, Shen J H, Han J G. Changes in soil organic carbon status and microbial community structure following biogas slurry application in a wheat-rice rotation. *Science of the Total Environment*, 2021, 757: 143786.
- [32] Hedlund K, Boddy L, Preston C M. Mycelial responses of the soil fungus, *Mortierella isabellina*, to grazing by *Onychiurus armatus* (collembola). *Soil Biology and Biochemistry*, 1991, 23(4): 361-366.
- [33] Reeleder R D, Miller J J, Coelho B R B, Roy R C. Impacts of tillage, cover crop, and nitrogen on populations of earthworms, microarthropods, and soil fungi in a cultivated fragile soil. *Applied Soil Ecology*, 2006, 33(3): 243-257.
- [34] Tang Y F, Wen G L, Li P P, Dai C, Han J G. Effects of biogas slurry application on crop production and soil properties in a rice-wheat rotation on coastal reclaimed farmland. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2019, 230(3): 51.
- [35] Huang Q Y, Zhao Z H, Chen W L. Effects of several low-molecular weight organic acids and phosphate on the adsorption of acid phosphatase by soil colloids and minerals. *Chemosphere*, 2003, 52(3): 571-579.
- [36] 郑学博, 樊剑波, 周静, 何园球. 沼液化肥配施对红壤旱地土壤养分和花生产量的影响. *土壤学报*, 2016, 53(3): 675-684.
- [37] 徐铭泽, 孙丽英, 张良, 张忠兰, 潘仕梅, 杨守军, 董仁杰. 沼液与化肥配施对西红柿生长和土壤组分的影响. *中国沼气*, 2017, 35(6): 75-82.
- [38] 孔云, 张婷, 李刚, 杨殿林, 赵建宁, 张贵龙, 王丽丽, 修伟明. 不同施肥方式下玉米田土壤中小型节肢动物的群落特征及稳定性. *玉米科学*, 2020, 28(2): 156-162.
- [39] 李伟, 崔丽娟, 赵欣胜, 张曼胤, 高常军, 张岩, 王义飞. 太湖岸带湿地土壤动物群落结构与多样性. *生态学报*, 2015, 35(4): 944-955.
- [40] Bedano J C, Cantú M P, Doucet M E. Soil springtails (Hexapoda: Collembola), symphylans and pauropods (Arthropoda: Myriapoda) under different management systems in agroecosystems of the subhumid Pampa (Argentina). *European Journal of Soil Biology*, 2006, 42(2): 107-119.
- [41] 李萌, 吴鹏飞, 王永. 贡嘎山东坡典型植被类型土壤动物群落特征. *生态学报*, 2015, 35(7): 2295-2307.
- [42] 武海涛, 吕宪国, 杨青, 姜明. 土壤动物主要生态特征与生态功能研究进展. *土壤学报*, 2006, 43(2): 314-323.
- [43] 罗梦娇, 李松松, 强大宏, 刘长海. 南泥湾湿地土壤动物群落组成与土壤理化性质的关系. *生态环境学报*, 2018, 27(8): 1432-1439.
- [44] 任小同, 秦富仓, 王迪海, 王树森, 马鑫, 台辉. 残塍沟壑区果园复合种植对土壤动物群落特征的影响. *中国土壤与肥料*, 2020, (1): 188-194.
- [45] 宋理洪, 武海涛, 吴东辉. 我国农田生态系统土壤动物生态学研究进展. *生态学杂志*, 2011, 30(12): 2898-2906.
- [46] 朱新玉, 朱波. 不同施肥方式对紫色土农田土壤动物主要类群的影响. *中国农业科学*, 2015, 48(5): 911-920.
- [47] 徐演鹏, 卢萍, 谭飞, 邹振峰, 吴建平, 林英华. 外源 C、N 干扰下吉林黑土区农田土壤动物组成与结构. *土壤学报*, 2013, 50(4): 800-809.
- [48] Wang S J, Tan Y, Fan H, Ruan H H, Zheng A B. Responses of soil microarthropods to inorganic and organic fertilizers in a poplar plantation in a coastal area of eastern China. *Applied Soil Ecology*, 2015, 89: 69-75.
- [49] Klavdivko E J. Tillage systems and soil ecology. *Soil and Tillage Research*, 2001, 61(1/2): 61-76.