

施用有机肥对黑土区农田大型土壤动物群落的影响

王文东 红梅^{1,2*} 刘鹏飞¹ 美丽¹ 赵乌英嘎¹ 赵巴音那木拉¹ 李志新³

(1. 内蒙古农业大学 草原与资源环境学院, 呼和浩特 010011;

2. 内蒙古自治区土壤质量与养分资源重点实验室, 呼和浩特 010011;

3. 扎赉特旗农业技术推广中心, 内蒙古 兴安盟 137600)

摘要 为了解有机肥施用对耕作黑土区大型土壤动物群落结构的影响, 2016年6—9月在内蒙古兴安盟扎赉特旗农业科技示范园区种植基地进行定点试验, 研究有机肥不同施用量 0 (OM1)、15 000 (OM2)、30 000 (OM3) 和 45 000 kg/hm² (OM4) 对大型土壤动物的群落结构的影响。共捕获大型土壤动物 2 628 只, 隶属于 46 个类群。结果表明: 隐翅甲科、正蚓科和象甲科幼虫等类群对有机肥施用变化适应性最高。OM4 处理显著提高大型土壤动物的个体密度 ($P < 0.05$), OM3 处理提高大型土壤动物类群数, 但未达到显著差异 ($P > 0.05$)。OM1 处理下多样性指数和均匀度指数最大, OM3 处理提高丰富度指数, 但均无显著差异 ($P > 0.05$)。有机肥处理后大型土壤动物具有明显的表聚性, 并且随着有机肥施用量的增加表聚性增强。大型土壤动物功能类群以腐食性为主, 并且随着有机肥施用量的增加其个体数增加。主成分分析表明, 线蚓科、隐翅甲科、长足蛇科幼虫和金龟甲科幼虫等土壤动物个体数及类群数对外界环境的变化最为敏感, 可以作为考察东北黑土区农田有机肥施加效应与缓解黑土地退化的评价指标。

关键词 大型土壤动物; 有机肥; 群落; 黑土; 功能群

中图分类号 S154.6

文章编号 1007-4333(2019)05-0174-11

文献标志码 A

Effect of application of organic manure on soil macrofauna community in black soil area

WANG Wendong¹, HONG Mei^{1,2*}, LIU Pengfei¹, MEI Li¹,
ZHAO Wuyingga¹, ZHAO Bayinnamula¹, LI Zhixin³

(1. College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010011, China;

2. Inner Mongolia Key Laboratory of Soil Quality and Nutrient Resources, Hohhot 010011, China;

3. Agricultural Technology Extension Center in Zhalaide Banner, Hinggan League 137600, China)

Abstract In order to understand the effect of organic manure application on the community structure of soil macrofauna in cultivated black soil, a fixed-point test was carried out in the planting base of Zhalaide Banner Agricultural Science and Technology Demonstration Park in Hinggan League, Inner Mongolia from June to September 2016. The effects of different application rates of organic manure 0 (OM1), 15 000 (OM2), 30 000 (OM3) and 45 000 kg/hm² (OM4) on the community structure of soil macrofauna were studied. A total of 2 628 soil macrofauna were captured, belonging to 46 groups. The results showed that the groups such as the Staphylinidae, Lumbricidae and Curculionidae larvae had the highest adaptability to the gradient of organic manure application. The OM4 treatment significantly increased the individual density of soil macrofauna ($P < 0.05$), and the OM3 treatment increased the number of soil macrofauna groups, but did not reach significant difference ($P > 0.05$). The diversity index and evenness index were the highest under the OM1 treatment, and the richness index was improved by the OM3 treatment, but there was no significant

收稿日期: 2018-03-09

基金项目: 农村农业部黑土地保护与利用试点项目(2016-GC0082-5)

第一作者: 王文东, 硕士研究生, E-mail: 389839525@qq.com

通讯作者: 红梅, 教授, 主要从事草原土壤资源利用与保护研究, E-mail: nmhm1970@sina.com

difference ($P > 0.05$). The soil macrofauna had obvious convergence after the organic manure application, and the convergence increased with the increasing of organic manure fertilization gradient. The functional groups of soil macrofauna were mainly rotted, and the number of individuals increased with the increasing of organic manure application. The principal component analysis (PCA) showed that the number of groups and the number of individuals of soil macrofauna such as Enchytraeidae, Staphylinidae, the larvae of the Dolichopodadae and the larvae of the Scarabaeoidea were most sensitive to the changes of the external environment, and it can be used as an evaluation index to investigate the effects of organic manure application and alleviate the black land degradation in the black soil region of Northeast China.

Keywords soil macrofauna; organic manure; community structure; tillage black soil; functional groups

黑土地是我国结构性最好的土壤之一^[1],是我国重要的农业商品粮地。多年来随着对黑土地资源的掠夺式开发利用,黑土地面临着黑土层变薄,土壤有机质大幅下降等严重问题^[2]。有机肥作为我国重要的肥源,可以增加和更新土壤有机质含量,提高土壤肥力^[3-4],改良土壤的理化性质,对缓解东北地区黑土贫瘠化具有重要意义。土壤动物是农田生态系统的重要组成部分之一^[5],也是生态系统物质循环的重要参与者^[6],具有提高有机质的降解速率和养分周转量^[7],促进植物养分的吸收,对土壤质量的变化情况起指示作用^[8],其群落特征指标可为土壤质量评价提供重要依据。已有研究表明,不同的耕作方式、种植制度和施肥措施一定程度上影响土壤动物的数量、种类和分布^[9-10],特别是对大型土壤动物群落结构的影响较大^[11-12]。近年来有关黑土区有机肥施用主要集中于有机和无机配施上的比较^[13-15],而对于有机肥不同施用量上的比较,以及明晰有机肥最佳施用量方面的探究较少。本研究选取东北黑土区开展大型土壤动物群落对有机肥施用量的响应,在节约有机肥资源的同时,提高有机肥的利用率,并明确施用有机肥后主要敏感的大型土壤动物的指示指标,以期缓解黑土退化,提高粮食产量及黑土地可持续利用提供重要依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古兴安盟扎赉特旗农业科技示范园区种植基地(46°45'N, 122°47'E),地处大兴安岭中段南麓,是大兴安岭向松嫩平原的过渡地带。该地属温带大陆性气候,年均降水量 400 mm,降水主要集中在 6—9 月;年平均气温 3.24 °C,海拔平均 206 m。无霜期 120~140 d。土壤类型为暗栗钙土,土壤基本理化性状为:有机质 38.26 g/kg、全氮 1.96 g/kg、速效磷 21.25 mg/kg、速效钾

176.91 mg/kg、容重 1.35 g/cm³、pH 为 7.97。

1.2 试验设计

试验设置 3 个有机肥施肥梯度,即 15 000 (OM2)、30 000 (OM3)和 45 000 kg/hm² (OM4),常规不施有机肥为对照(OM1),3 次重复,共 12 个小区,小区面积为 10 m×10 m=100 m²。施用的有机肥为当地农户家发酵好的牛粪,养分含量为:有机质 107.19 g/kg、全氮 11.69 g/kg、全磷 4.71 g/kg、全钾 5.65 g/kg、pH 为 8.31。种植作物为玉米,品种为先玉 335,玉米株距 20 cm,行距 50 cm。试验于 2016 年 4 月 30 日耕种,于 9 月 26 日进行收获,作物田间管理一致。

1.3 样品采集与动物鉴定

样品采集于 2016 年玉米的生长季 6—9 月进行逐月采样。按照 0~10、10~20 和 20~30 cm 分层取样,取样面积为 20 cm×20 cm=400 cm²,设置 3 个重复。大型土壤动物采用手捡法收集,将收集到的大型土壤动物置于体积分数为 75%的酒精瓶中做好标签。大型土壤动物的分类鉴定参考《中国土壤动物检索图鉴》^[16]和《内蒙古昆虫志》^[17],并在显微镜(Olympus CKX41)和体视显微镜(SZ78 系列)下对标本进行,所有大型土壤动物鉴定到科。

1.4 数据处理

个体数占总个体数 10%以上的土壤动物类群为优势类群,1%~10%的土壤动物类群为常见类群,1%以下的为稀有类群。大型土壤动物功能类群的划分参考尹文英^[16]、徐演鹏等^[1]和刘霞等^[18]的研究,将有机肥不同施用量下的大型土壤动物划分为植食性、捕食性、腐食性和杂食性 4 个功能类群。

对大型土壤动物群落特征进行分析时,采用 Shannon 多样性指数(H'),Pielou 均匀度指数(E),Margalef 丰富度指数(D)和 Simpson 优势度指数(C)进行分析^[19-20]。本研究中大型土壤动物指标的显著性与均值比较采用单因素方差分析(one-way

ANOVA)。大型土壤动物主要类群指标对有机肥的响应关系采用主成分分析(PCA)进行分析^[21]。数据分析处理与作图采用 Excel 2003, Spss 18.0 进行。群落多样性指数计算公式如下:

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

$$E = H / \ln S$$

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

$$C = \sum_{i=1}^s (n_i / N)^2$$

式中: P_i 为第 i 个物种的个体数占总个体数的比率; S 为类群数; N 为总个体数; n_i / N 为各个体数占总个体数的百分数。本研究数据以平均值±标准误差表示。

2 结果与分析

2.1 大型土壤动物群落组成

由表 1 可知, 2016 年 6—9 月于研究区调查共捕获大型土壤动物 2 628 只, 隶属 6 纲 13 目 39 科 46 个类群。其中, 优势类群为隐翅甲科、象甲科幼虫和正蚓科三类, 占总个体数的 65.11%; 常见类群为叶甲科、金龟甲科、步甲科、叶甲科幼虫、瓢甲科幼虫、金龟甲科幼虫、缨甲科幼虫、长足虻科幼虫、线蚓科和奥地蜈蚣科 10 类, 占总个体数的 27.53%, 优势类群与常见类群构成了大型土壤动物的主要类群; 其余 33 类为稀有类群, 占总个体数的 7.36%。不同有机肥施用量处理存在差异, 对照 OM1 捕获量最少, 仅有 231 只, 占总捕获量的 8.79%, OM4 处理捕获量最多, 有 1 201 只, 占总捕获量的 45.70%; 类群数以 OM3 处理最多, 对照 OM1 最少, 分别为 35 和 24 种。

2.2 大型土壤动物群落特征

2.2.1 大型土壤动物群落水平特征

由表 2 可知, 有机肥处理后大型土壤动物密度均高于对照 OM1, 其中 OM4 处理显著高于对照 OM1 ($P < 0.05$)。从类群数来看, 有机肥处理后大型土壤动物类群数高于对照 OM1, 但没有达到显著差异 ($P > 0.05$)。对照 OM1 的大型土壤动物多样性指数最高 (2.03), 但与其他处理差异不显著 ($P > 0.05$)。对照 OM1 的均匀度指数最高 (0.73), 并且随着有机肥施用量的增加均匀度指数呈降低的趋势。丰富度指数以 OM3 处理最大, 优势度指数以 OM4 处理最大, 但均没达到显著差异 ($P > 0.05$)。

2.2.2 大型土壤动物群落垂直特征

由表 3 可以看出, 大型土壤动物的密度与类群数总体上随土层深度增加而减少。对整个研究区大型土壤动物垂直分布可以看出, 0~10 cm 土层与 10~20 cm 和 20~30 cm 土层的大型土壤动物密度达到显著差异 ($P < 0.05$)。各土层大型土壤动物类群数差异不显著 ($P > 0.05$)。大型土壤动物多样性指数、丰富度指数和优势度指数土层间差异不显著, 0~10 cm 土层均匀度指数显著低于 10~20 和 20~30 cm 土层的均匀度指数 ($P < 0.05$)。

如图 1 所示, 大型土壤动物在土壤垂直分布中具有明显表聚性, 随着有机肥施用量的增加表聚性增强, 8 月表聚性与 6、7 和 9 月相比较强。8 月 OM4 处理 0~10 cm 土层个体数比例较 OM3 处理有下降的趋势。

2.3 大型土壤动物功能群变化特征

由图 2 所示, 4 种功能类群在不同的月份存在一定的差异。捕食性大型土壤动物个体数总体上随时间呈 6 和 7 月增加, 8 和 9 月降低的趋势, 处理间随有机肥施用量的增加呈上升趋势, 7 月 OM4 处理个体数低于 OM3 处理, 但没有显著差异 ($P > 0.05$)。腐食性和植食性大型土壤动物个体数总体随月份呈上升的趋势, 腐食性大型土壤动物在 7 和 8 月 OM3 处理个体数高于 OM4 处理, 但没有显著差异 ($P > 0.05$), 9 月 OM4 处理个体数显著高于对照 OM1 ($P < 0.05$)。植食性土壤动物个体数以 9 月 OM4 处理最高且与对照 OM1 达到显著差异 ($P < 0.05$)。杂食性土壤动物个体数月份动态变化较小, OM4 处理在 8 月个体数最高与其他处理没有显著差异 ($P > 0.05$)。

2.4 有机肥对大型土壤动物主要群落特征指标的影响

本试验对大型土壤动物的个体数、类群数、多样性指数、均匀度指数、丰富度指数、优势度指数、密度、优势类群(隐翅甲科、正蚓科、象甲科幼虫等三类)和常见类群(金龟甲科、缨甲科幼虫、线蚓科、步甲科、长足虻科幼虫、叶甲科幼虫、叶甲科、金龟甲科幼虫、瓢甲科幼虫、奥地蜈蚣科等 9 类)的个体数量等 20 个土壤动物特征指标采用主成分法进行分析, 确定对有机肥施用环境下最敏感的土壤动物特征指标。通过选取前两个主成分, 如表 4 所示, 累计贡献率可达 84.53%, 可以包含 20 个土壤动物特征指标的大部分信息。

表1 不同处理样地大型土壤动物类群和数量组成

Table 1 Group and quantitative composition of soil macrofauna in different treatment sites

类群 Group	功能群 Functional group	OM1			OM2			OM3			OM4			总计 Total		
		密度/ (只/m ²)	比例/ %	Ratio	密度/ (只/m ²)	比例/ %	Ratio	密度/ (只/m ²)	比例/ %	Ratio	密度/ (只/m ²)	比例/ %	Ratio	密度/ (只/m ²)	比例/ %	Ratio
		Density	%	Ratio	Density	%	Ratio	Density	%	Ratio	Density	%	Ratio	Density	%	Ratio
叶甲科 Chrysomelidae	Pr	1.11	5.19	4.61	1.48	1.67	2.12	1.20	1.07	1.37	2.25					
象甲科 Curculionidae	Pr	0.19	0.89	0.00	0.00	1.11	1.41	0.00	0.00	0.32	0.53					
叩甲科 Elateridae	Ph	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.08	0.02	0.04					
隐翅甲科 Staphylinidae	Sa	7.59	35.47	25.93	8.33	29.07	36.98	21.11	18.88	16.53	27.17					
蚁甲科 Pselaphidae	Pr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.37	0.33	0.09	0.15					
跳甲科 Alticinae	Pr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19	0.24	0.00	0.00	0.05	0.08					
金龟甲科 Scarabaeidae	Ph	0.19	0.89	1.74	0.56	2.96	3.77	10.19	9.11	3.47	5.71					
步甲科 Carabidae	Pr	0.93	4.35	5.20	1.67	2.69	3.42	1.76	1.57	1.76	2.89					
缨甲科 Ptiliidae	Ph	0.00	0.00	0.28	0.09	1.30	1.65	0.19	0.17	0.39	0.65					
伪瓢甲科 Endomychidae	Pr	0.09	0.42	0.00	0.00	0.09	0.11	0.00	0.00	0.05	0.08					
锹甲科 Lucanidae	Sa	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.08	0.02	0.04					
叶甲科幼虫 Chrysomelidae larvae	Ph	0.28	1.31	9.21	2.96	1.48	1.88	1.11	0.99	1.46	2.40					
象甲科幼虫 Curculionidae larvae	Ph	0.83	3.88	0.00	0.00	0.00	0.00	33.24	29.73	8.52	14.00					
叩甲科幼虫 Elateridae larvae	Ph	0.28	1.31	0.28	0.09	0.37	0.47	0.09	0.08	0.21	0.34					
花萤科幼虫 Cantharidae larvae	Pr	0.00	0.00	0.28	0.09	0.09	0.11	0.00	0.00	0.05	0.08					
隐翅甲科幼虫 Staphylinidae larvae	Ph	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19	0.24	0.83	0.74	0.25	0.42					
瓢甲科幼虫 Coccinellidae larvae	Pr	0.37	1.73	0.87	0.28	0.46	0.59	1.94	1.74	0.76	1.26					
蚁甲科幼虫 Pselaphidae larvae	Pr	0.19	0.89	0.28	0.09	0.09	0.11	0.19	0.17	0.14	0.23					
阔甲科幼虫 Histeridae larvae	Pr	0.09	0.42	0.00	0.00	0.09	0.11	0.09	0.08	0.07	0.11					
金龟甲科幼虫 Scarabaeidae larvae	Sa	0.09	0.42	3.17	1.02	2.59	3.29	1.39	1.24	1.27	2.09					
缨甲科幼虫 Ptiliidae larvae	Sa	0.46	2.15	2.02	0.65	3.61	4.59	5.00	4.47	2.43	4.00					
鹬虻科 Rhagionidae	Pr	0.00	0.00	0.28	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.04					
毛蚊科 Bibionidae	Sa	0.19	0.89	1.74	0.56	0.28	0.36	0.19	0.17	0.30	0.49					
剑虻科 Therevidae	Pr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.11	0.09	0.08	0.05	0.08					

表 1(续)

类群 Group	功能群 Functional group	OM1			OM2			OM3			OM4			总计 Total		
		密度/ (只/m ²)	比例/ %	Ratio	密度/ (只/m ²)	比例/ %	Ratio	密度/ (只/m ²)	比例/ %	Ratio	密度/ (只/m ²)	比例/ %	Ratio	密度/ (只/m ²)	比例/ %	Ratio
		Density	Ratio		Density	Ratio		Density	Ratio		Density	Ratio		Density	Ratio	
盗虻科 Asilidae	Pr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.11	0.09	0.08	0.08	0.05	0.08	0.08	0.08
长足虻科 Dolichopodidae	Ph	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.08	0.02	0.04	0.04	0.04
蝇科 Muscidae	Om	0.00	0.00	0.00	0.09	0.28	0.28	0.46	0.59	0.59	0.08	0.08	0.16	0.27	0.27	0.27
长足虻科幼虫 Dolichopodidae larvae	Pr	1.02	4.77	0.56	0.56	1.74	1.74	2.87	3.65	3.65	1.74	1.74	1.60	2.63	2.63	2.63
蕈蚊科幼虫 Mycetophilidae larvae	Pr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.28	0.36	0.36	0.00	0.00	0.07	0.11	0.11	0.11
舞虻科幼虫 Empididae larvae	Pr	0.00	0.00	0.09	0.09	0.28	0.28	0.37	0.47	0.47	0.83	0.74	0.32	0.53	0.53	0.53
食木虻科幼虫 Xylophagiae larvae	Pr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.65	0.83	0.83	0.74	0.74	0.37	0.61	0.61	0.61
管巢蛛科 Clubionidae	Pr	0.09	0.42	0.19	0.19	0.59	0.59	0.00	0.00	0.00	0.08	0.08	0.09	0.15	0.15	0.15
平腹蛛科 Gnaphosidae	Pr	0.37	1.73	0.37	0.37	1.15	1.15	0.19	0.24	0.24	0.00	0.00	0.23	0.38	0.38	0.38
跳蛛科 Salticidae	Pr	0.19	0.89	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.17	0.09	0.15	0.15	0.15
正蚓科 Lumbricidae	Sa	5.46	25.51	10.74	10.74	33.43	33.43	19.07	24.26	24.26	20.54	20.54	14.56	23.94	23.94	23.94
大胡类 Megadrile oligochaetes	Sa	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.02	1.30	1.30	0.00	0.00	0.25	0.42	0.42	0.42
土蟯科 Cydidae	Ph	0.00	0.00	0.09	0.09	0.28	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.04	0.04	0.04
长蟯科 Lygaeidae	Ph	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.11	0.11	0.00	0.00	0.02	0.04	0.04	0.04
鼠妇科 Porcellio spicicornis	Ph	0.00	0.00	0.09	0.09	0.28	0.28	0.19	0.24	0.24	0.00	0.00	0.07	0.11	0.11	0.11
木蠹科 Kalotermitidae	Sa	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.11	0.11	0.00	0.00	0.02	0.04	0.04	0.04
线蚓科 Enchytraeidae	Sa	0.46	2.15	0.56	0.56	1.74	1.74	3.80	4.83	4.83	2.32	2.32	1.85	3.04	3.04	3.04
奥地蜈蚣科 Oryidae	Pr	0.28	1.31	1.02	1.02	3.17	3.17	0.74	0.94	0.94	0.91	0.91	0.76	1.26	1.26	1.26
叶蝉科 Cicadellidae	Ph	0.00	0.00	0.09	0.09	0.28	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.04	0.04	0.04
蚰蜒科 Scutigerae	Pr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.11	0.11	0.00	0.00	0.02	0.04	0.04	0.04
长奇盲蛛科 Phalangidae	Pr	0.09	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.04	0.04	0.04
蚊科 Formicidae	Om	0.56	2.62	0.28	0.28	0.87	0.87	0.19	0.24	0.24	1.16	1.16	0.58	0.95	0.95	0.95
总类群数 Group number		24		26	26	35	35	31	31	31	46	46				
总个体数 Individuals		231		347	347	849	849	1 201	1 201	1 201	2 628	2 628				

注: Pr, 捕食性; Ph, 植食性; Om, 杂食性; Sa, 腐食性。

Note: Pr, Predatory; Ph, Phytophagous; Om, Omnivorous; Sa, Saprophagy.

表 2 不同处理大型土壤动物群落特征

Table 2 Soil macrofauna communities in different treatments

处理 Treatment	类群数 Group number	H'	E	D	C	密度/(只/m ²) Density
OM1	16.00±0.94 a	2.03±0.05 a	0.73±0.02 a	3.49±0.10 a	0.22±0.01 a	16.04±2.73 b
OM2	16.33±1.52 a	1.91±0.07 a	0.69±0.01 a	3.26±0.39 a	0.23±0.01 a	24.10±2.02 b
OM3	21.67±1.52 a	2.01±0.08 a	0.66±0.01 a	3.81±0.19 a	0.23±0.02 a	58.96±22.92 ab
OM4	21.00±1.89 a	1.92±0.22 a	0.63±0.06 a	3.35±0.33 a	0.26±0.08 a	83.40±3.48 a

注：同一列的不同字母表示不同处理之间差异显著($P < 0.05$)， H' ：多样性指数； E ：均匀度指数； D ：丰富度指数； C ：优势度指数。下同。

Note: Different letters indicate significant difference among treatments in the same column at 0.05 level. H' , the diversity index; E , the evenness index; D , the richness index; C , Simpson Dominance Index. The same below.

表 3 不同土层大型土壤动物群落特征

Table 3 Soil macrofauna communities in different layer

土层/cm Soil layer	类群数 Group number	H'	E	D	C	密度/(只/m ²) Density
0~10	23.33±2.13 a	1.97±0.06 a	0.63±0.01 c	3.48±0.25 a	0.22±0.01 a	1 527.50±248.02 a
10~20	21.67±1.51 a	2.27±0.17 a	0.73±0.04 ab	4.01±0.38 a	0.17±0.03 a	460.00±69.08 b
20~30	17.67±0.54 a	2.26±0.09 a	0.79±0.04 a	3.81±0.13 a	0.16±0.03 a	202.50±17.12 b

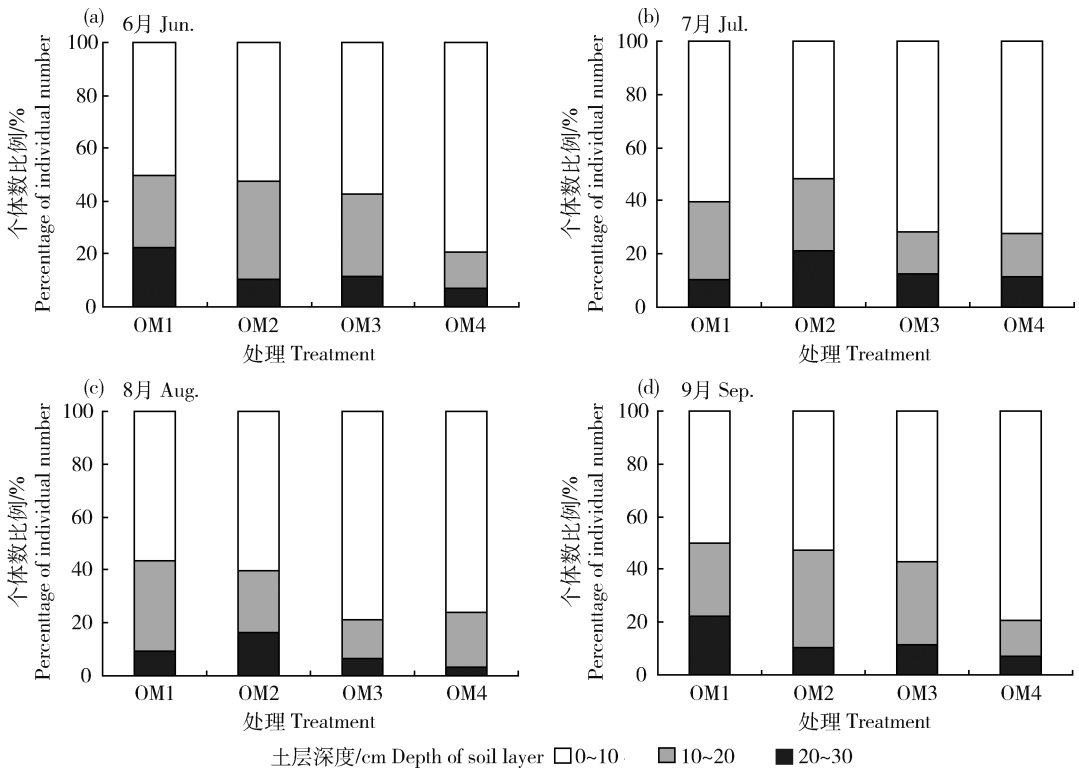
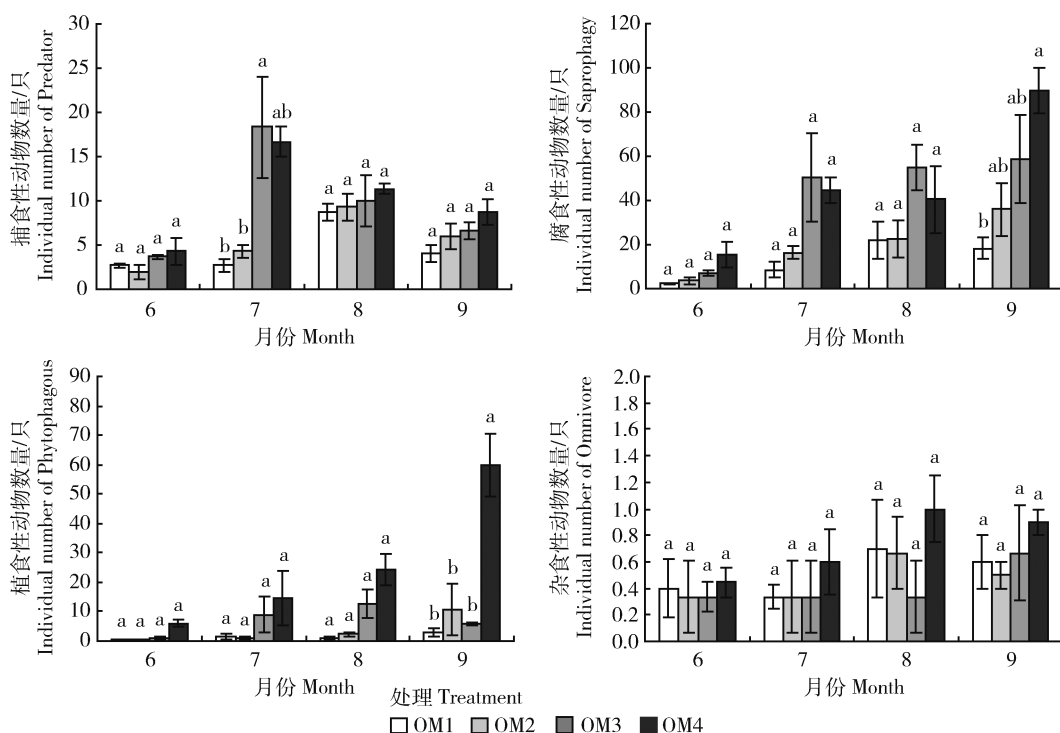


图 1 不同处理下大型土壤动物垂直分布

Fig. 1 Influences of different treatments on vertical distribution of soil macrofauna communities



不同字母表示同一月份不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different letters indicated significant difference among treatments in the same month at 0.05 level.

图2 不同处理对大型土壤动物功能类群的影响

Fig. 2 Influences of different treatments on functional groups of soil macrofauna communities

表4 大型土壤动物主成分特征根与方差贡献率

Table 4 Eigenvalue and variance contribution of principal components

主成分 Principal component	特征根 Eigenvalues	方差贡献率/% Variance contribution	累计方差贡献率/% Cumulative variance contribution
主成分 1	7.068	59.935	59.931
主成分 2	1.825	24.596	84.534

如表5所示,综合分值前5名为:线蚓科、隐翅甲科、类群数、长足虻科幼虫、金龟甲科幼虫,这表明:这5个大型土壤动物特征指标对有机肥处理最为敏感,对大型土壤动物群落贡献较大,可以作为考察有机肥施肥效应的特征指标。

3 讨论与结论

3.1 有机肥处理后大型土壤动物群落组成特征

长期施用有机肥能够提高土壤有机质含量与酶活性^[22],改善土壤理化性质,对提高田间作物产量具有重要的意义。同时土壤动物个体数量与群落的空间分布特征能够对环境的变化迅速的做出反应^[23-24]。不同的有机肥处理大型土壤动物个体数差

异明显而类群数不明显。本研究表明,与对照 OM1 相比,有机肥处理后大型土壤动物密度不断增加,OM4 处理显著提高了大型土壤动物密度 ($P < 0.05$),较对照 OM1 提高了 419.95%,产生的原因可能是有机肥经过大型土壤动物的分解,可以稳定的释放营养物质,为大型土壤动物提供有利的生存环境^[25],从而增加了大型土壤动物的个体密度。大型土壤动物类群数随着有机肥施用量的增加类群数先增加后降低,OM3 处理下类群数最高,类群数增加主要是由于稀有的大型土壤动物类群增加引起^[26],表1所示的蛭蛭科、木蠹科和长蝽科等仅在 OM3 处理中出现,而其他处理均没有出现,由于稀有类群对环境的变化比较敏感,只有在特定的环境中

表5 大型土壤动物主要群落特征指标主成分综合值与排序

Table 5 Comprehensive value and Rank of characteristics of soil macrofauna communities

指标 Index	主成分1 Principal component 1	主成分2 Principal component 2	综合分值 Comprehensive value	排序 Rank
个体数 Individual	0.283	-0.070	0.211	9
类群数 Group number	0.277	0.119	0.245	3
H'	-0.086	0.310	-0.005	19
E	-0.280	0.078	-0.207	20
D	0.080	0.407	0.147	12
C	0.231	-0.270	0.128	14
密度 Density	0.283	-0.070	0.211	10
隐翅甲科 Staphylinidae	0.253	0.213	0.245	2
正蚓科 Lumbricidae	0.288	-0.028	0.223	6
象甲科幼虫 Curculionidae larvae	0.194	-0.313	0.090	17
金龟甲科 Scarabaeoidea	0.245	-0.217	0.150	11
缨甲科幼虫 Ptiliidae larvae	0.283	-0.033	0.218	8
线蚓科 Enchytraeidae	0.254	0.210	0.245	1
步甲科 Carabidae	0.208	0.264	0.219	7
长足虻科幼虫 Dolichopodadae larvae	0.228	0.248	0.232	4
叶甲科幼虫 Chrysomelidae larvae	0.004	-0.016	0.000	18
叶甲科 Chrysomelidae	0.090	0.315	0.136	13
金龟甲科幼虫 Scarabaeoidea larvae	0.224	0.251	0.230	5
瓢甲科幼虫 Coccinellidae larvae	0.210	-0.280	0.109	15
奥地蜈蚣科 Oryidae	0.172	-0.165	0.103	16

才能存活,这表明不同有机肥处理对大型土壤动物具有异质性。同时,为了进一步考察有机肥施肥效应进行了主成分分析,结果表明,线蚓科、隐翅甲科、类群数、长足虻科幼虫、金龟甲科幼虫对不同的有机肥施用量最为敏感,对增施有机肥后的环境的变化具有一定的指示作用^[27]。大型土壤动物群落对不同有机肥施用量下土壤环境因子具有不同的变化特征。

3.2 有机肥处理后大型土壤动物群落垂直分布特征

增施有机肥可以提高土壤有机质和总孔隙度,降低土壤容重^[28],随着土层的加深,土壤容重增大,土壤孔隙度逐渐减小,能够提供土壤动物呼吸的氧气减少,这成为了土壤动物地下分布的限制因

子^[29]。在本研究中,大型土壤动物的个体数和类群数随土层的加深逐渐减少,这与曹阳等^[30]研究结论基本一致。随着有机肥施用量的增加大型土壤动物表聚性增强,可能是增施在表层的有机肥为大型土壤动物提供了充足的养分,有利于土壤动物的生存^[31]。表层土壤优势度指数最高,这主要是因为隐翅甲科由对照CK的52只平均增加到OM处理下的164只,提高了215.38%。不同月份间土壤垂直分布具有明显表聚性,但随着时间的推移,9月份大型土壤动物表聚性降低,这是因为大型土壤动物容易受气候及外界人为干扰^[32],已有研究表明温度和降水是影响土壤动物垂直分布的主要气候因子^[33],9月份降水减少,地表温度开始下降,使得土壤动物垂直向下迁移,表现为垂直分布上的差异。7和8

月大型土壤动物个体数表聚性较明显,可能的原因是7和8月水热条件适中,促进大型土壤动物的活动,使有机肥在土壤中快速分解,为大型土壤动物提供了充足的食物来源。

3.3 有机肥处理后大型土壤动物功能群特征

不同有机肥处理后,大型土壤动物以腐食性个体数居多,占有功能群个体数的63.6%,植食性为19.9%,捕食性为15.4%,杂食性土壤动物个体数较少为1.1%。腐食性土壤动物主要以微生物分解后的有机肥为食物来源^[34],对生态系统的物质分解具有重要促进作用。对腐食性土壤动物个体数的综合分析,随着有机肥施用量的增加腐食性大型土壤动物个体数增多,以OM4处理下土壤动物个体数最多,占有腐食性土壤动物个体数的38.7%。捕食性土壤动物作为农田生态系统中营养级最高的类群,主要在土壤表层活动^[35],以捕食其他土壤动物从而影响食物链下层营养级^[36],8月降水较多,地表流水的冲刷及土壤容重的增加,使得活动能力受限,是8和9月捕食性土壤动物个体数下降的主要原因。9月份OM4处理下植食性土壤动物显著增加,主要由于农田植被单一^[37],OM4处理下的作物生长旺盛,导致9月份枯落物较多,为植食性土壤动物提供了充足的食物有关。杂食性土壤动物作为广适性物种在本研究样地中个体数较少,月份动态变化幅度较小,主要集中在水热条件较好的8月份。

参考文献 References

[1] 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[J].土壤学报,2013,50(4):801-808
Xu Y P, Lu P, Tan F, Zou Z F, Wu J P, Lin Y H. Composition and structure of cropland soil fauna in black soil area of Jilin as affected by exogenous carbon and nitrogen[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(4): 801-808 (in Chinese)

[2] 王艳丽,范世涛,张强,姜镐国.吉林省黑土地资源开发利用现状及保护对策[J].吉林农业大学学报,2010,32(S):57-59
Wang Y L, Fan S T, Zhang Q, Jiang G G. Resources development makes use of the present condition protection counterplan Jilin Province[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2010, 32(S): 57-59, 70 (in Chinese)

[3] 韩晓增,王凤仙,王凤菊,邹文秀.长期施用有机肥对黑土肥力及作物产量的影响[J].干旱地区农业研究,2010,28(1):66-71
Han X Z, Wang F X, Wang F J, Zou W X. Effects of long-term organic manure application on crop yield and fertility of black soil[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(1):

66-71 (in Chinese)

[4] 查燕,武雪萍,张会民,蔡典雄,朱平,高洪军.长期有机无机配施黑土土壤有机碳对农田基础地力提升的影响[J].中国农业科学,2015,48(23):4649-4659
Zha Y, Wu X P, Zhang H M, Cai D X, Zhu P, Gao H J. Effects of long-term organic and inorganic fertilization on enhancing soil organic carbon and basic soil productivity in black soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23): 4649-4659 (in Chinese)

[5] 谷艳芳,张莉,丁圣彦,钦绳武.长期施肥对麦田大型土壤动物群落结构的影响[J].生态学报,2011,31(17):4901-4905
Gu Y F, Zhang L, Ding S Y, Qin S W. The soil macrofaunal community structure under a long-term fertilization in wheat field[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(17): 4901-4905 (in Chinese)

[6] Dong W H, Yin X Q. Transformation of carbon and nitrogen by earthworms in the decomposition processes of broad-leaved litters[J]. *Chinese Geographical Science*, 2007, 17(2): 166-172 (in Chinese)

[7] 汪冠收.兰考县玉米秸秆还田分解中土壤动物群落特征及其作用研究[D].开封:河南大学,2012
Wang G S. Study on characteristics of soil fauna community and their function in reusing of cornstalk in Lankao county [D]. Kaifeng: Henan University, 2012 (in Chinese)

[8] 朱新玉,董志新,况福虹,朱波.长期施肥对紫色土农田土壤动物群落的影响[J].生态学报,2013,33(2):465-471
Zhu X Y, Dong Z X, Kuang F H, Zhu B. Effects of fertilization regimes on soil faunal communities in cropland of purple soil [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(2): 465-471 (in Chinese)

[9] 战丽莉,许艳丽,张兴义,潘凤娟,裴希超,刘振宇.耕作方式对中小型土壤动物多样性的影响[J].生态学杂志,2012,31(9):2371-2377
Zhan L L, Xu Y L, Zhang X Y, Pan F J, Pei X C, Liu Z Y. Effects of tillage mode on the diversity of soil meso- and micro-fauna[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(9): 2371-2377 (in Chinese)

[10] 杨文亭,王晓维,徐健程,缪建群,王淑彬,杨滨娟,黄国勤.玉米-大豆间作和施氮对红壤地中小型土壤动物群落特征的影响[J].应用生态学报,2017,28(9):2993-3002
Yang W T, Wang X W, Xu J C, Miao J Q, Wang S B, Yang B J, Huang G Q. Effect of corn-soybean intercropping and nitrogen application on characteristics of soil meso- and micro-invertebrate community in red soil [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(9): 2993-3002 (in Chinese)

[11] Klaus B, Martijn B, Jaap B, Michael B, Søren C, David D, Fleming E, Andreas F, Lucie G, Katarina H, Paul M, Juha M, Christophe R, Heikki S, Fabienne T F, Wim H, Van der P, Stefan S. Long-term organic farming fosters below and aboveground biota: Implications for soil quality, biological control and productivity[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(9): 2297-2308

- [12] Jean P R, Jérôme M, Miguel C, Michel G. Soil macrofaunal biodiversity in Amazonian pastures; Matching sampling with patterns[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(8): 2178-2187
- [13] 刘春柱, 侯萌, 张晴, 倪浩为, 陈一民, 隋跃宇, 焦晓光. 长期施入不同量有机肥对农田黑土土壤养分、产量的影响[J]. *中国农学通报*, 2017, 33(8): 68-71
Liu C Z, Hou M, Zhang Q, Ni H W, Chen Y M, Sui Y Y, Jiao X G. Effect of long-term application of different amounts of organic fertilizer on black soil nutrients and yield[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(8): 68-71 (in Chinese)
- [14] 梁尧, 苑亚茹, 韩晓增, 李禄军, 邹文秀, 任军, 李刚. 化肥配施不同剂量有机肥对黑土团聚体中有机碳与腐殖酸分布的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(6): 1586-1594
Liang Y, Fan Y R, Han X Z, Li L J, Zou W X, Ren J, Li G. Distribution of organic carbon and humic acids in aggregates of Mollisol as affected by amendments with different rates of organic manure plus mineral fertilizer[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(6): 1586-1594 (in Chinese)
- [15] 战丽莉, 许艳丽, 韩晓增. 长期施肥对东北黑土玉米田土壤动物影响[J]. *土壤与作物*, 2012, 1(2): 94-99
Zhan L L, Xu Y L, Han X Z. Effect of long-term fertilization on soil fauna diversity in the farmland of black soil in northeast China[J]. *Soil and Crop*, 2012, 1(2): 94-99 (in Chinese)
- [16] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 1998
Yin W Y. *Pictorial Keys to Soil Animal of China* [M]. Beijing: Science Press, 1998 (in Chinese)
- [17] 能乃扎布. 内蒙古昆虫志[M]. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1999
Nengna Z B. *Insect Records of Inner Mongolia* [M]. Hohhot: Inner Mongolia People's Publishing House, 1999 (in Chinese)
- [18] 刘霞, 赵东, 程建伟, 陈海燕, 刘新民, 宝音陶格涛, 李永宏. 放牧和刈割对内蒙古典型草原大型土壤动物的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(6): 1869-1878
Liu X, Zhao D, Cheng J W, Chen H Y, Liu X M, Baoyin T G T, Li Y H. Effects of grazing and mowing on macrofauna communities in a typical steppe of Inner Mongolia[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(6): 1869-1878 (in Chinese)
- [19] 刘鹏飞, 红梅, 常菲, 高海燕, 李志新, 马玺. 秸秆还田对黑土区西部农田中小型土壤动物群落的影响[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(1): 139-146
Liu P F, Hong M, Chang F, Gao H Y, Li Z X, Ma X. Impact of straw returning on cropland soil mesofauna community in the western part of black soil area[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(1): 139-146 (in Chinese)
- [20] 张雪萍, 黄丽荣, 姜丽秋. 大兴安岭北部森林生态系统大型土壤动物群落特征[J]. *地理研究*, 2018, 27(3): 509-518
Zhang X P, Huang L R, Jiang L Q. Characteristics of macro-soil fauna in forest ecosystem of northern Da Hinggan Mountains[J]. *Geography Research*, 2018, 27(3): 509-518 (in Chinese)
- [21] 杨旭, 高梅香, 张雪萍, 林琳, 沙迪, 张利敏. 秸秆还田对耕作黑土中小型土壤动物群落的影响[J]. *生态学报*, 2016, 37(7): 2-11
Yang X, Gao M X, Zhang X P, Lin L, Sha D, Zhang L M. Effect straw-returning management black soil area on meso-micro soil fauna in a cultivated[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 37(7): 2-11 (in Chinese)
- [22] 龚伟, 颜晓元, 蔡祖聪, 王景燕, 胡庭兴, 宫渊波. 长期施肥对华北小麦-玉米轮作土壤物理性质和抗蚀性影响研究[J]. *土壤学报*, 2009, 46(3): 520-525
Gong W, Yan X Y, Cai Z C, Wang J Y, Hu T X, Gong Y B. Effects of long-term fertilization on soil physical properties and erosion-resistance under wheat-maize rotation system in north China plain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(3): 520-525 (in Chinese)
- [23] 朱永恒, 赵春雨, 王宗英, 濮励杰. 我国土壤动物群落生态学研究综述[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(12): 1477-1481
Zhu Y H, Zhao C Y, Wang Z Y, Pu L J. Research on soil animal community ecology in China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(12): 1477-1481 (in Chinese)
- [24] 潘林, 王文峰, 郭继勋, 孙玉坤. 扎龙自然保护区大型土壤动物的群落结构[J]. *土壤通报*, 2012, 43(4): 781-786
Pan L, Wang W F, Guo J X, Sun Y K. Community structure of macrofauna in Zhalong national nature reserve[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(4): 781-786 (in Chinese)
- [25] 蒋海东, 杨青, 吕宪国. 土壤动物在农业生态系统中的研究进展[J]. *土壤通报*, 2006, 37(4): 805-807
Jiang H D, Yang Q, Lv X G. Advance of study on soil fauna in agricultural ecosystem[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(4): 805-807 (in Chinese)
- [26] 张庆宇, 黄初女, 王光达, 丁洪玲, 李永一, 安金花. 秸秆还田对水田改旱田地块玉米产量及地下大型土壤动物群落的影响[J]. *延边大学农学报*, 2013, 35(4): 335-342
Zhang Q Y, Huang C N, Wang G D, Ding H L, Li Y Y, An J H. Effect of straw returning to upland field alternated from paddy field on maize yields and large soil animal communities[J]. *Journal of Agricultural Science Yanbian University*, 2013, 35(4): 335-342 (in Chinese)
- [27] 潘林, 董原, 郭继勋. 扎龙湿地自然保护区土壤动物研究[J]. *安徽农业科学*, 2006, 34(24): 6587-6590
Pan L, Dong Y, Guo J X. Study on soil animal in Zhalong Wetland Nature Reserve[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2006, 34(24): 6587-6590 (in Chinese)
- [28] 王西和, 刘骅, 贾宏涛, 蒋平安. 长期施肥对灰漠土有机质和物理性质的影响[J]. *新疆农业科学*, 2014, 51(1): 58-65
Wang X H, Liu H, Jia H T, Jiang P A. Effects of long-term fertilization on soil organic matter and physical properties in gray desert[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2014, 51(1): 58-65 (in Chinese)

- [29] 杨旭,林琳,张雪萍,张利敏,沙迪. 松嫩平原典型黑土耕作区中小型土壤动物时空分布特征[J]. 生态学报, 2016, 36(11): 3255-3259
 Yang X, Lin L, Zhang X P, Zhang L M, Sha D. Spatio-temporal distribution characteristics of meso-micro soil fauna in typical cultivated blacksoil in the Songnen plain area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(11): 3255-3259 (in Chinese)
- [30] 曹阳,高梅香,张雪萍,董承旭. 黑龙江省不同纬度梯度农田大型土壤动物群落分布特征[J]. 生态学报, 2017, 37(5): 1677-1687
 Cao Y, Gao M X, Zhang X P, Dong C X. Distribution characteristics of soil macro-faunal communities along a latitudinal gradient in farmland of Heilongjiang Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(5): 1677-1687 (in Chinese)
- [31] 邱丽丽,张宝田,付关强,韩慧莹. 松嫩草地碱蒿生境中小型土壤动物群落动态特征[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(11): 111-115
 Qiu L L, Zhang B T, Fu G Q, Han H Y. Dynamic characteristics of soil meso-and micro-fauna community in *Artemisia anethifolia* habitat in Songnen grassland[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28(11): 111-115 (in Chinese)
- [32] 吴鹏飞,杨大星. 若尔盖高寒草甸退化对中小型土壤动物群落的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(13): 3745-3757
 Wu P F, Yang D X. Effect of habitat degradation on soil meso-and microfaunal communities in the Zoige Alpine Meadow, Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(13): 3745-3757 (in Chinese)
- [33] Adeduntan S A. Diversity and abundance of soil mesofauna and microbial population in South-Western Nigeria [J]. *African Journal of Plant Science*, 2009, 3(9): 210-216
- [34] 林琳,邬天媛,李景科,张雪萍. 大庆草甸草原区大型土壤动物功能类群[J]. 地理研究, 32(1): 43-53
 Lin L, Wu T Y, Li J K, Zhang X P. Studies on functional groups of macro-soil animals in Daqing meadow steppe based on the new classification[J]. *Geographical Research*, 32(1): 43-53 (in Chinese)
- [35] 周泓杨,张丹桔,张捷,赵燕波,赵波,魏大平,张健. 马尾松人工林郁闭度对大型土壤动物功能群的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(6): 1860-1868
 Zhou H Y, Zhang D J, Zhang J, Zhao Y B, Zhao B, Wei D P, Zhang J. Effects of canopy density on the functional group of soil macro fauna in *Pinus massoniana* plantations[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(6): 1860-1868 (in Chinese)
- [36] 胡静,杨效东. 热带次生林2种不同捕食策略地表蜘蛛的种内、种间竞争强度及土壤N的调节作用[J]. 中国农学通报, 2012, 28(22): 59-65
 Hu J, Yang X D. The competition of different strategy spiders and the regulating effect of soil N in tropical secondary forest [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(22): 59-65 (in Chinese)
- [37] 叶岳,周运超,武绍义,腾磊,黄钟,谢泽秀,乌俊杰. 黔南喀斯特地区不同土地利用方式下大型土壤动物功能类群研究[J]. 河南农业科学, 2009(3): 47-51
 Ye Y, Zhou Y C, Wu S Y, Teng L, Huang Z, Xie Z X, Wu J J. Functional groups of soil macrofauna under different land use patterns in Karst of south Guizhou[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2009(3): 47-51 (in Chinese)

责任编辑: 王燕华