

不同施肥方式对耕地黑土中小型土壤动物功能类群的影响

景佳爽, 林琳*, 李艳芹, 张利敏

(哈尔滨师范大学地理科学学院/寒区地理环境监测与空间信息服务黑龙江省重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150025)

摘要 为探讨不同施肥方式对中小型土壤动物功能类群的影响,以黑龙江省哈尔滨市呼兰区耕作黑土为试验区,对施有机肥、施半有机肥、施无机肥和对照4种不同处理方式耕地黑土中小型土壤动物各功能类群进行研究。结果表明:共捕获中小型土壤动物50类,隶属于2门6纲14目44科,共6176只,数量占比为杂食性(60.54%)>腐食性(22.60%)>菌食性(11.37%)>植食性(2.91%)>捕食性(2.57%),类群数大小为植食性(13个)=捕食性(13个)>腐食性(11个)>杂食性(7个)>菌食性(6个),杂食性中小型土壤动物为优势类群;耕地黑土中小型土壤动物的多样性指数、均匀度指数植食性最低,杂食性最高。与对照组相比,施有机肥时中小型土壤动物类群总数和各功能类群个体数显著增加,施无机肥时显著减少,施肥降低了中小型土壤动物各功能类群的丰富度;分析群落相似性表明,杂食性中小型土壤动物在不同处理方式间相似性程度较高;CCA分析表明,土壤全磷、全氮、pH分别对施有机肥、半有机肥、无机肥样地中小型土壤动物功能类群分布影响显著。中小型土壤动物各功能类群生长受3种施肥方式影响明显,中小型土壤动物各功能类群更适宜在施有机肥下生存。

关键词 施肥方式;中小型土壤动物;功能类群;群落特征

中图分类号 X174 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2023)06-0066-07

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.06.018



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Effects of Different Fertilization Methods on Functional Groups of Small and Medium-Sized Soil Animals in Cultivated Black Soil
JIANG Jia-shuang, LIN Lin, LI Yan-qin et al (School of Geographical Sciences of Harbin Normal University/Key Laboratory of Geographical Environment Monitoring and Spatial Information Service in Cold Regions of Heilongjiang Province, Harbin, Heilongjiang 150025)

Abstract In order to explore the effect of different fertilization methods on the functional groups of small and medium-sized soil animals, this paper studied the functional groups of small and medium-sized soil animals in the cultivated black soil of Hulan District, Harbin City, Heilongjiang Province under four different treatments of organic fertilizer, semi-organic fertilizer, inorganic fertilizer and control. The results showed that: a total of 6 176 small and medium-sized soil animals were captured, belonging to 44 families, 14 orders, 6 classes, 2 phyla. The number proportion was omnivorous (60.54%) > saprophytic (22.60%) > bacteriophageic (11.37%) > herbivorous (2.91%) > predatory (2.57%). The number of groups was phytophagous (13) = predatory (13) > saprophytic (11) > omnivorous (7) > bacteriophageic (6). The small and medium-sized soil animals were the dominant group; The diversity index and evenness index of herbivorous small and medium-sized soil animals in cultivated black soil are the lowest, and the diversity index and evenness index of omnivorous small and medium-sized soil animals are the highest. Compared with the control group, the total number of small and medium-sized soil animal groups and individual number of each functional group increased significantly when applying organic fertilizer, and decreased significantly when applying inorganic fertilizer. Fertilization decreased the richness of each functional group of small and medium-sized soil animal; The community similarity analysis showed that the similarity degree of omnivorous small and medium-sized soil animals among different treatments was high; CCA analysis showed that total phosphorus, total nitrogen and pH value of soil had significant effects on the distribution of functional groups of small and medium-sized soil animals in organic, semi-organic and inorganic fertilizer plots. The three fertilization methods have obvious effects on the growth of the functional groups of small and medium-sized soil animals, and applying organic fertilizer is more beneficial to the survival of the functional groups of small and medium-sized soil animals.

Key words Fertilization method; Small and medium-sized soil animals; Functional groups; Community characteristics

东北黑土区作为全球仅有的三大黑土区之一,因其土壤肥沃、适宜农耕的优势,成为我国重要的商品粮产区。由于人类长期的掠夺式开发以及用养失衡,东北黑土区面临着黑土层变薄、有机质缺失、生态功能退化等问题^[1]。已有研究表明,施肥能直接有效地改善土壤肥力,提高土壤质量,是农业生产中缓解黑土退化的重要措施^[2-3]。

土壤动物是土壤中必不可少的存在,在土壤环境中的物质循环与能量流动中充当着消费者与分解者的角色,是土壤生态系统的重要组成部分^[4-5]。部分土壤动物类群在功能和食性上具有相似的生态位,通过各个功能类群间的食物网关系,在生态系统中扮演着类似的生态角色^[6-9]。按照土壤动

物食性将土壤动物分为5种功能类群:植食性、捕食性、腐食性、菌食性、杂食性^[10]。土壤动物各功能类群的分异规律是反应土壤质量变化的重要生态指标^[11-12]。施肥可以改变土壤理化环境,能够引起土壤动物各功能类群的群落多样性和分布特征发生变化,土壤动物各功能类群群落结构因施肥方式不同,变化有所差异^[13]。目前,关于土壤动物受不同施肥方式的影响研究较少。基于此,该研究主要探究不同施肥方式对耕地黑土植食性、捕食性、腐食性、菌食性、杂食性5种中小型土壤动物功能类群个体、类群及群落特征的影响,揭示不同施肥方式下中小型土壤动物各功能类群群落特征差异,为耕作黑土区的施肥方式提供科学建议。

1 研究区概况

研究区位于黑龙江省哈尔滨市呼兰区(45°49'~46°25'N, 126°11'~127°19'E),总面积2197 km²,海拔115~150 m,整体地势平坦开阔,年平均气温4.5℃,年降雨量507.7 mm,属于温带大陆性季风气候,年日照时数2491.7 h,

基金项目 黑龙江省普通本科高等学校青年创新人才项目(UNPYSCT-2020132)。

作者简介 景佳爽(1997—),女,河北承德人,硕士研究生,研究方向:土壤动物。*通信作者,讲师,博士,从事资源环境与生态研究。

收稿日期 2022-08-13

日照充足,全年无霜期平均 144 d^[14]。试验地为耕作黑土为主体的农田生态系统,农作物为大豆,耕作方式为翻耕,施肥方式以复合肥为主。

2 研究方法

2.1 样地设计 选取哈尔滨市呼兰区耕作黑土农田为样地,耕种作物为大豆,试验样地分为 A、B、C、D 4 个样地,不同试验样地间隔 10 m。A 样地施有机肥(OM);B 样地施半有机肥(OM+NPK);C 样地施加无机肥(NPK);D 样地为对照组(CK),不做处理。每个处理重复 4 次,共计 16 个样地,每个样地大小为 5 m×4 m。不同处理组肥料以等氮量为标准,采用四分法去除干扰,在播种前一次性均匀施入。施肥前采样测定总氮量,计算有机肥的总氮量,并将总氮量计入施氮量,以确保每一次施肥处理的氮量基本相等,排除氮肥流失对试验的影响。

2.2 采集方法及鉴定

2.2.1 中小型土壤动物采集与鉴定。在每个样地随机取 4 个重复样,每个取样点大小为 10 cm×10 cm,除去地表杂草后以 5~15 cm 深度为取样层,各土样采用四分法分别混合装入袋内密封,共 64 个土壤样品,土样标记好后带回实验室,用干漏斗(tullgern apparatus)分离提取样袋中的中小型土壤动物,用 75%的乙醇进行固定,置于实体显微镜下观察,中小型土壤动物鉴定参照《中国土壤动物检索图鉴》^[15],一般鉴定到科,少数鉴定到目,统计个体数量。

2.2.2 土壤理化性质的测定。每个取样点内采集 1 份 5~15 cm 混合土样,分别标记好后将土壤装袋带回实验室自然风干,用于分析土壤理化性质。用 pH 酸度计(PT-10, sartorius)测定土壤 pH;用重铬酸钾容量法-外加加热法测定土壤有机质;用半微量凯氏法测定土壤全氮;用 NaOH 熔融-钼蓝比色法测定土壤全磷;用 NaOH 熔融-火焰光度法测定土壤全钾^[16]。

2.3 数据分析及处理方法 采用 Shannon-Wiener 物种多样性指数(H),Pielou 物种均匀度指数(E),Margalef(D)物种丰富度指数和 Jaccard(q)相似性指数分析中小型土壤动物功能类群群落特征,计算公式如下^[17]:

Shannon-Wiener 物种多样性指数公式:

$$H = -\sum P_i \ln P_i (i=1, 2, 3, \dots, S)$$

Pielou 物种均匀度指数公式:

$$E = H / \ln S$$

Margalef 物种丰富度指数公式:

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

Jaccard 相似性指数公式:

$$q = c / (a+b-c)$$

式中, S 为土壤所有类群数; $P_i = N_i / N$, N_i 为第 i 个类群的个体数, N 为群落中所有物种的个体数, a 、 b 分别代表群落 A、B 的类群数, c 代表两群落的共有类群数。

利用 SPSS25.0 软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA),并且用 LSD 法对不同处理之间进行差异显著性检验($P < 0.05$),分析中小型土壤动物各功能类群个体数、类群数及群落特征数据;通过典范对应分析(CCA)分析中小型土壤动物与环境因子之间的关系,通过 Canoco5.0 软件进行分析运算。所有数据用 Excel2010 进行初步处理,用 Origin 2019b 作图。

3 结果与分析

3.1 不同施肥方式下中小型土壤动物功能类群组成 样地共捕获中小型土壤动物 50 类,共 6 176 只,隶属于 2 门 6 纲 14 目 44 科(表 1),等节跳科(Isotomidae)、甲螨亚目(Oribatida)、前气门亚目(Prostigmata)和中气门亚目(Mesostigmata)均为优势类群,其占总个体数的 76.75%;摇蚊科(Chironomidae)、圆跳科(Sminthuridae)、山跳科(Pseudochortidae)、球角跳科(Hypogastruridae)、长角跳科(Entomobryidae)和棘跳科(Onychiuridae)为常见类群,其占总个体数的 15.30%;其余为稀有类群,占总个体数的 7.95%。研究区中小型土壤动物个体数分析显示:杂食性(3 739 只)>腐食性(1 396 只)>菌食性(702 只)>植食性(180 只)>捕食性(159 只),类群数分析显示:植食性(13 个)=捕食性(13 个)>腐食性(11 个)>杂食性(7 个)>菌食性(6 个),杂食性中小型土壤动物为优势类群。

表 1 耕作黑土区中小型土壤动物不同功能类群

Table 1 Different functional groups of small and medium-sized soil animals in cultivated black soil area

土壤动物类群 Soil fauna	OM 个体数 Individuals	OM+NPK 个体数 Individuals	NPK 个体数 Individuals	CK 个体数 Individuals	总个体数 Total individuals	频度 Frequency %	多度 Abundance	功能类群 Functional groups
摇蚊科 Chironomidae	6	6	2	86	100	1.62	++	Ph
大蚊科 Tipulidae	0	0	0	2	2	0.03	+	Ph
蚋科 Simuliidae	0	0	1	0	1	0.02	+	Ph
叶甲科 Chrysomelidae	5	1	4	1	11	0.18	+	Ph
金龟甲科 Scarabaeoidea	0	2	27	5	34	0.55	+	Ph
象甲科 Curculionidae	2	0	0	0	2	0.03	+	Ph
叩甲科 Elateridae	3	2	0	2	7	0.11	+	Ph
网蝽科 Tingidae	3	1	0	3	7	0.11	+	Ph
奇蝽科 Encocephalidae	0	0	4	0	4	0.06	+	Ph
土蝽科 Cydidae	3	0	0	0	3	0.05	+	Ph
蝉科 Cicadidae	0	0	0	1	1	0.02	+	Ph
夜蛾科 Noctuidae	0	0	0	4	4	0.06	+	Ph
蝙蝠蛾科 Hepialidae	0	0	0	4	4	0.06	+	Ph
个体数 Individuals	22	12	38	108	180	2.91	++	
类群数 Number of groups	6	5	5	9	13			

接下表

续表 1

土壤动物类群 Soil fauna	OM 个体数 Individuals	OM+NPK 个体数 Individuals	NPK 个体数 Individuals	CK 个体数 Individuals	总个体数 Total individuals	频度 Frequency %	多度 Abundance	功能类群 Functional groups
蜘蛛目 Araneida	0	3	0	0	3	0.05	+	Pr
鹬虻科 Rhagionidae	15	3	6	21	45	0.73	+	Pr
长足虻科 Dolichopodadae	6	4	0	8	18	0.29	+	Pr
剑虻科 Therevidae	0	0	2	1	3	0.05	+	Pr
舞虻科 Empididae	7	5	0	3	15	0.24	+	Pr
步甲科 Carabidae	9	3	1	2	15	0.24	+	Pr
苔甲科 Scydmaenidae	0	0	0	5	5	0.08	+	Pr
花蝽科 Anthocoridae	3	0	1	0	4	0.06	+	Pr
虎甲科 Cicindelidae	2	0	0	0	2	0.03	+	Pr
地蜈蚣目 Geophilomorpha	4	2	1	5	12	0.19	+	Pr
石蜈蚣目 Lithobiomorpha	0	0	0	11	11	0.18	+	Pr
蚁科 Formicidae	12	0	1	11	24	0.39	+	Pr
么地蜈蚣科 Geophilellidae	0	2	0	0	2	0.03	+	Pr
个体数 Individuals	58	22	12	67	159	2.57	++	
类群数 Number of groups	8	7	6	9	13			
等节跳科 Isotomidae	303	338	224	213	1 078	17.45	+++	Sa
驼跳科 Cyphoderidae	22	38	0	0	60	0.97	+	Sa
圆跳科 Sminthuridae	19	14	0	34	67	1.08	++	Sa
鳞跳科 Tomocetidae	3	0	1	3	7	0.11	+	Sa
疣跳科 Neanuridae	10	10	26	9	55	0.89	+	Sa
山跳科 Pseudachorutidae	14	22	32	22	90	1.46	++	Sa
线蚓科 Enchytraeidae	5	0	2	13	20	0.32	+	Sa
冬大蚊科 Trichoceridae	3	2	0	0	5	0.08	+	Sa
葬甲科 Silphidae	2	2	0	1	5	0.08	+	Sa
锹甲科 Lucanidae	1	2	0	0	3	0.05	+	Sa
长小蠹科 Platypodidae	0	0	1	5	6	0.10	+	Sa
个体数 Individuals	382	428	286	300	1 396	22.60	+++	
类群数 Number of groups	10	8	6	8	11			
球角跳科 Hypogastruridae	26	26	0	101	153	2.48	++	Ba
长角跳科 Entomobryidae	15	21	45	64	145	2.35	++	Ba
棘跳科 Onychiuridae	124	68	121	77	390	6.31	++	Ba
粪蚊科 Scatopsidae	6	4	0	0	10	0.16	+	Ba
尖眼罩蚊科 Sciaiidae	0	0	1	0	1	0.02	+	Ba
出尾罩甲科 Scaphidiidae	1	0	0	2	3	0.05	+	Ba
个体数 Individuals	172	119	167	244	702	11.37	+++	
类群数 Number of groups	5	4	3	4	6			
甲螨亚目 Oribatida	629	568	420	432	2 049	33.18	+++	Om
中气门亚目 Mesostigmata	193	168	239	141	741	12.00	+++	Om
前气门亚目 Prostigmata	221	243	220	188	872	14.12	+++	Om
隐翅甲科 Staphylinidae	26	10	8	17	61	0.99	+	Om
扁甲科 Cucujidae	2	2	1	0	5	0.08	+	Om
瓢甲科 Coccinellidae	1	0	3	0	4	0.06	+	Om
蓟马科 Thripidae	4	2	0	1	7	0.11	+	Om
个体数 Individuals	1 076	993	891	779	3739	60.54	+++	
类群数 Number of groups	7	6	6	5	7			
总个体数 Total individuals	1 710	1 574	1 394	1 498	6 176	100.00		
总类群数 Total number of groups	36	30	26	35	50			

注:OM,有机肥;OM+NPK,半有机肥;NPK,无机肥;CK,对照;Ph,植食性;Pr,捕食性;Sa,腐食性;Ba,菌食性;Om,杂食性;“+++”为优势类群,个体数占总捕获量的10%以上;“++”为常见类群,个体数占总捕获量的1%~10%;“+”为稀有类群,个体数占总捕获量的1%以下。

Note:OM, Organic fertilizer;OM + NPK, Semi organic fertilizer;NPK, Inorganic fertilizer;CK, Contrast;Ph, Herbivorous;Pr, Predatory;Sa, Saprophytic;Ba, Bacteriophagy;Om, Omnivorous;“+++” is the dominant group, and the number of individuals accounts for more than 10% of the total catch;“++” is a common group, and the number of individuals accounts for 1%~10% of the total catch;“+” is a rare group, and the number of individuals accounts for less than 1% of the total catch.

不同处理方式下中小型土壤动物个体数总数不同。对照组中小型土壤动物个体数分析显示:杂食性(779只)>腐食性(300只)>菌食性(244只)>植食性(108只)>捕食性(67只);施有机肥中小型土壤动物个体数分析显示:杂食性(1 076只)>腐食性(382只)>菌食性(172只)>捕食性(58只)>植食性(22只);施半有机肥中小型土壤动物个体数分析显示:杂食性(993只)>腐食性(428只)>菌食性(119只)>捕食性(22只)>植食性(12只);施无机肥中小型土壤动物个体数分析显示:杂食性(891只)>腐食性(286只)>菌食性(167只)>植食性(38只)>捕食性(12只)。综上可知,施有

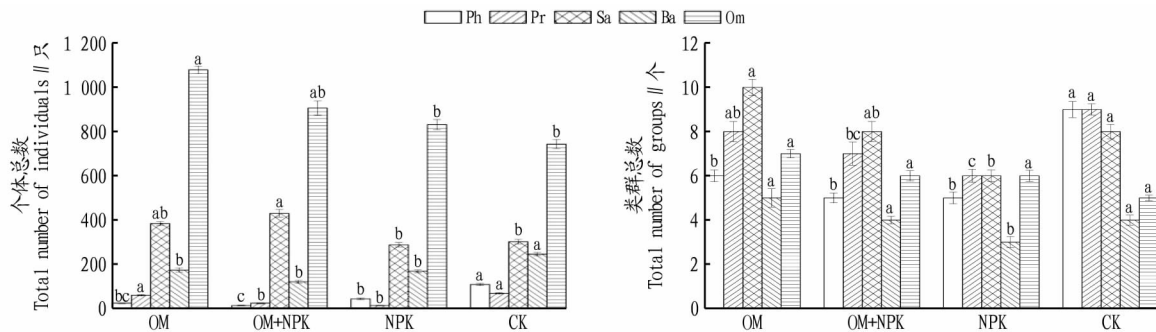
机肥和半有机肥使中小型土壤动物的个体数增多,施无机肥使中小型土壤动物的个体数减少,原因是有机肥和半有机肥为中小型土壤动物提供了充足的有机质,中小型土壤动物的食物来源增多,数量增加,而施无机肥造成土壤中有有机质缺失,中小型土壤动物食物来源减少,数量减少。

3.2 不同施肥方式下中小型土壤动物各功能类群结构变化

方差分析表明,不同施肥方式之间中小型土壤动物各功能类群的个体数、类群数差异显著(图1)。与对照组相比,施有机肥处理对植食性、菌食性和杂食性中小型土壤动物个体数影响显著($P<0.05$);施半有机肥处理对除杂食性中小型土

壤动物外其他功能类群个体数均影响显著 ($P<0.05$)；施无机肥处理对植食性、捕食性和菌食性中小型土壤动物个体数影响显著 ($P<0.05$)。与对照组相比,施有机肥处理对植食性和菌食性中小型土壤动物类群数影响显著 ($P<0.05$)；施半有机肥处理对植食性、捕食性和菌食性中小型土壤动物类群数影

响显著 ($P<0.05$)；施无机肥处理对除杂食性中小型土壤动物外其他功能类群数均影响显著 ($P<0.05$)。中小型土壤动物各功能类群个体和类群总数施有机肥时显著增加,施无机肥时显著减少 ($P<0.05$)。



注: OM, 有机肥; OM+NPK, 半有机肥; NPK, 无机肥; CK, 对照; Ph, 植食性; Pr, 捕食性; Sa, 腐食性; Ba, 菌食性; Om, 杂食性; 不同小写字母表示不同处理之间差异达显著水平 ($P<0.05$)。

Note: OM, Organic fertilizer; OM + NPK, Semi organic fertilizer; NPK, Inorganic fertilizer; CK, Contrast; Ph, Herbivorous; Pr, Predatory; Sa, Saprophytic; Ba, Bacteriophagy; Om, Omnivorous; Different lowercase letters indicated that the difference between different treatments reached a significant level ($P<0.05$).

图 1 不同施肥方式中小型土壤动物各功能类群个体总数和类群总数分布

Fig. 1 Distribution of total number of individuals and groups of various functional groups of small and medium-sized soil animals in different fertilization methods

3.3 不同施肥方式对中小型土壤动物各功能类群群落多样性的影响 不同处理组中小型土壤动物的多样性指数、均匀度指数植食性均最低,杂食性均最高(表 2)。与对照组相比,施肥降低了中小型土壤动物各功能类群的丰富度。施有机肥对捕食性、菌食性、杂食性中小型土壤动物的多样性指数、均匀度指数影响显著 ($P<0.05$),对植食性、杂食性中小型土壤动物的丰富度指数影响显著 ($P<0.05$);施半有机肥对捕

食性、腐食性、杂食性中小型土壤动物的多样性指数、均匀度指数影响显著 ($P<0.05$),对植食性、捕食性、腐食性中小型土壤动物丰富度指数影响显著 ($P<0.05$);施无机肥对腐食性、杂食性中小型土壤动物的多样性指数、均匀度指数影响显著 ($P<0.05$),对植食性、捕食性中小型土壤动物的丰富度指数影响显著 ($P<0.05$)。

表 2 不同施肥方式下中小型土壤动物各功能类群群落特征(平均值±标准误)

Table 2 Community characteristics of various functional groups of small and medium-sized soil animals under different fertilization methods (mean ± standard error)

处理 Handle	生态指数 Ecological index	Ph	Pr	Sa	Ba	Om
OM	H	0.06±0.01 a	0.15±0.02 b	0.50±0.02 a	0.28±0.05 a	0.93±0.04 a
	E	0.08±0.02 a	0.15±0.02 b	0.41±0.03 a	0.32±0.05 a	0.64±0.03 a
	D	0.49±0.15 bc	0.76±0.18 a	0.71±0.09 ab	0.42±0.09 a	0.69±0.04 a
OM+NPK	H	0.06±0.02 a	0.15±0.03 b	0.25±0.05 b	0.14±0.04 b	0.93±0.06 b
	E	0.05±0.01 a	0.12±0.05 b	0.21±0.04 b	0.18±0.06 b	0.71±0.07 b
	D	0.41±0.11 c	0.55±0.27 b	0.66±0.11 a	0.26±0.06 a	0.62±0.05 ab
NPK	H	0.05±0.02 a	0.24±0.01 a	0.18±0.03 b	0.10±0.03 b	0.92±0.05 b
	E	0.04±0.02 a	0.13±0.06 a	0.19±0.02 b	0.12±0.04 b	0.71±0.03 b
	D	0.35±0.16 b	0.54±0.26 b	0.46±0.07 c	0.24±0.08 a	0.60±0.06 ab
CK	H	0.10±0.03 a	0.28±0.03 a	0.57±0.03 a	0.15±0.02 b	1.47±0.04 c
	E	0.09±0.03 a	0.22±0.02 a	0.39±0.08 a	0.14±0.03 b	1.04±0.03 c
	D	0.70±0.16 a	1.36±0.10 a	0.97±0.08 bc	0.63±0.07 a	0.70±0.03 b

注: OM, 有机肥; OM+NPK, 半有机肥; NPK, 无机肥; CK, 对照; Ph, 植食性; Pr, 捕食性; Sa, 腐食性; Ba, 菌食性; Om, 杂食性; H, Shannon-Wiener 物种多样性指数; E, Pielou 物种均匀性指数; D, Margalef 物种丰富度指数; 同列不同字母表示处理间存在显著差异 ($P<0.05$)。

Note: OM, Organic fertilizer; OM + NPK, Semi-organic fertilizer; NPK, Inorganic fertilizer; CK, Contrast; Ph, Herbivorous; Pr, Predatory; Sa, Saprophytic; Ba, Bacteriophagy; Om, Omnivorous; H, Shannon-Wiener species diversity index; E, Pielou species evenness index; D, Margalef species richness index; Different letters in the same column indicate significant differences between treatments ($P<0.05$).

3.4 不同施肥方式下中小型土壤动物功能类群群落相似性分析 不同处理组的组间相似性分析表明:杂食性中小型土

壤动物相似性程度较高,其他中小型土壤动物功能类群相似性程度较低(表 3)。植食性中小型土壤动物在施半有机肥

与有机肥(0.57)、施半有机肥与对照组(0.56)为中等相似,其余方式之间为中等不相似(0.27~0.43),仅施有机肥与无机肥(0.22)为极不相似;捕食性中小型土壤动物在施无机肥与半有机肥(0.30)、施半有机肥与对照组(0.45)为中等不相似,其余方式之间为中等相似(0.50~0.56);腐食性中小型土壤动物在施有机肥与半有机肥(0.80)为极相似,在施有机肥与对照组(0.64)、施有机肥与无机肥(0.60)、施无机肥与对照组

(0.75)为中等相似,其余方式之间为中等不相似(0.27~0.45);菌食性中小型土壤动物在施有机肥与半有机肥(0.80)、对照组(0.80)为极相似,在施半有机肥与对照组(0.60)为中等相似,其余方式之间为中等不相似(0.33~0.40);杂食性中小型土壤动物在施有机肥与半有机肥(0.86)、无机肥(0.86)、施半有机肥与对照组(0.83)为极相似,其余方式之间为中等相似(0.57~0.71)。

表3 不同施肥方式下中小型土壤动物各功能类群相似性指数

Table 3 Similarity index of various functional groups of small and medium-sized soil animals under different fertilization methods

功能类群 Functional groups	施肥方式 Fertilization method	OM	OM+NPK	NPK	CK
Ph	OM	1			
	OM+NPK	0.57	1		
	NPK	0.22	0.43	1	
	CK	0.36	0.56	0.27	1
Pr	OM	1			
	OM+NPK	0.50	1		
	NPK	0.56	0.30	1	
	CK	0.55	0.45	0.50	1
Sa	OM	1			
	OM+NPK	0.80	1		
	NPK	0.60	0.27	1	
	CK	0.64	0.45	0.75	1
Ba	OM	1			
	OM+NPK	0.80	1		
	NPK	0.33	0.40	1	
	CK	0.80	0.60	0.40	1
Om	OM	1			
	OM+NPK	0.86	1		
	NPK	0.86	0.71	1	
	CK	0.71	0.83	0.57	1

注:OM,有机肥;OM+NPK,半有机肥;NPK,无机肥;CK,对照;Ph,植食性;Pr,捕食性;Sa,腐食性;Ba,菌食性;Om,杂食性;群落相似性划分,0~0.25表示极不相似,0.25~0.50表示中等不相似,0.50~0.75表示中等相似,0.75~1.00表示极相似。

Note:OM, Organic fertilizer;OM + NPK, Semi-organic fertilizer;NPK, Inorganic fertilizer;CK, Contrast;Ph, Herbivorous;Pr, Predatory;Sa, Saprophytic;Ba, Bacteriophagy;Om, Omnivorous;Community similarity division:0~0.25 indicates extremely dissimilar,0.25~0.50 indicates moderately dissimilar,0.50~0.75 indicates moderately similar, and 0.75~1.00 indicates extremely similar.

3.5 不同施肥方式下中小型土壤动物各功能类群与环境因子的关系 CCA分析表明,土壤全磷、全氮、pH分别在施有机肥、半有机肥、无机肥处理组中对中小型土壤动物功能类群分布影响明显(图2)。

施有机肥组前2个排序轴共解释了94.72%的生境和动物物种变化,全磷对中小型土壤动物功能类群影响最大。植食性中小型土壤动物与全钾存在正相关关系,与全磷存在负相关关系;捕食性中小型土壤动物与pH存在正相关关系,与全氮、有机质存在负相关关系;腐食性、菌食性中小型土壤动物与全磷存在正相关关系,与全钾存在负相关关系;植杂食性中小型土壤动物与全氮、有机质存在正相关关系,与pH存在负相关关系。

施半有机肥组前2个排序轴共解释了94.89%的生境和动物物种变化,全氮对中小型土壤动物功能类群影响最大。捕食性中小型土壤动物与有机质存在正相关关系;腐食性、菌食性中小型土壤动物与全氮、pH存在正相关关系,与全钾、全磷存在负相关关系;植食性、杂食性中小型土壤动物与

全钾、全磷存在正相关关系,与全氮、pH存在负相关关系。

施无机肥组前2个排序轴共解释了93.88%的生境和动物物种变化,土壤pH对中小型土壤动物功能类群影响最大。植食性中小型土壤动物与全氮、全钾存在正相关关系,与pH存在负相关关系;腐食性、菌食性、杂食性中小型土壤动物与pH存在正相关关系,与全氮、全钾存在负相关关系;捕食性中小型土壤动物与有机质、全磷存在负相关关系。

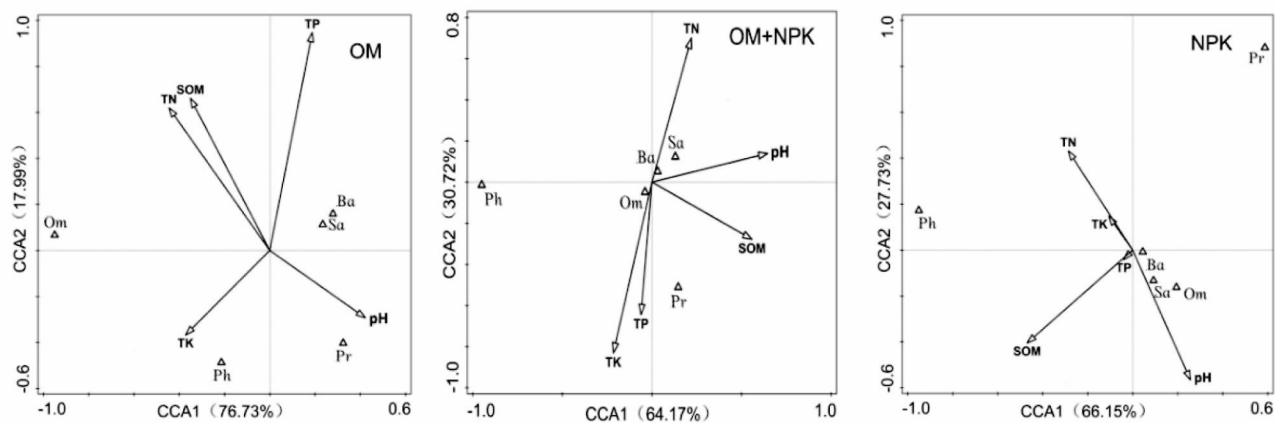
4 讨论与结论

4.1 不同施肥方式中小型土壤动物功能类群群落组成特征

土壤动物群落分布特征能够反映土壤环境的状况。各处理方式间土壤动物个体数差异显著^[18]。与对照组相比,3种施肥方式下中小型土壤动物各功能类群的个体数均发生了变化,其中杂食性中小型土壤动物个体数增加最明显。原因是杂食性中小型土壤动物作为优势类群,其对环境的适应能力要强于其他功能类群,由于具有多种食性,食物来源充足,并且可以通过取食其他功能类群获得能量,因此个体数增加最明显^[9,17]。中小型土壤动物个体数和类群数在施有机肥

下最多,施无机肥下最少,说明施有机肥促进了中小型土壤动物各功能类群生长,施无机肥抑制了中小型土壤动物各功能类群生长,原因是有机肥增加了土壤中的有机质含量,降

低了土壤容重,改善了土壤动物的生存环境^[18];无机肥使土壤结构受到破坏,引起土壤板结,降低了土壤孔隙度,导致可供土壤动物呼吸的氧气减少,不利于土壤动物生存^[19]。



注:OM,有机肥;OM+NPK,半有机肥;NPK,无机肥;Ph,植食性;Pr,捕食性;Sa,腐食性;Ba,菌食性;Om,杂食性;SOM,有机质;pH,土壤pH;TK,全钾;TN,全氮;TP,全磷。

Note:OM,Organic fertilizer;OM + NPK,Semi-organic fertilizer;NPK,Inorganic fertilizer;CK, Contrast;Ph, Herbivorous;Pr, Predatory;Sa, Saprophytic;Ba, Bacteriophagy;Om, Omnivorous;SOM, Organic matter;pH, Soil pH value;TK, Total potassium;TN, Total nitrogen;TP, Total phosphorus.

图2 不同施肥方式下土壤动物各功能类群与环境因子的典范对应分析的排序

Fig.2 Ranking chart of canonical correspondence analysis between functional groups of soil animals and environmental factors under different fertilization methods

4.2 不同施肥方式中小型土壤动物功能类群群落多样性特征

与对照组相比,施有机肥菌食性中小型土壤动物的多样性、均匀度显著增加,腐食性中小型土壤动物的均匀度有所增加,但不显著,原因是施有机肥使土壤微生物数量增加,菌食性中小型土壤动物的生长与繁殖得到促进,并且,土壤腐殖质随着土壤微生物数量增多而增加,腐食性中小型土壤动物食物来源增多,但是,由于腐食性中小型土壤动物数量较多且食物来源充足,其数量增加较少,导致其均匀度增加不显著^[9,20-21]。施半有机肥菌食性中小型土壤动物的均匀度增加,但不显著,原因是半有机肥有一定量的无机肥,这部分无机肥对菌食性中小土壤动物生存有抑制作用,导致菌食性中小型土壤动物的均匀度增加不显著^[9,19,21]。施无机肥降低了土壤肥力,提高了土壤容重,中小型土壤动物各功能类群的食物来源和活动受限,其多样性、均匀度、丰富度均降低^[19,22]。

该研究发现,就4种处理方式下的多样性指数、均匀度指数来说,植食性中小型土壤动物均最低,杂食性中小型土壤动物均最高,这是因为,施肥增加了杂食性中小型土壤动物竞争资源的能力,使其在竞争中始终占据优势,同时,杂食性中小型土壤动物兼具多种食性,食物来源充足,而植食性中小型土壤动物食物来源主要为植物根系,食物来源与数量不及杂食性中小型土壤动物广泛,导致其生长与繁殖受限^[9]。施肥导致中小型土壤动物各功能类群中的稀有类群(蝉科、夜蛾科、蝙蝠蛾科、苔甲科、石蜈蚣目、出尾罩甲科)大量减少甚至消失,从而降低了中小型土壤动物各功能类群的丰富度^[2]。

4种方式间的相似性分析表明,杂食性中小型土壤动物的相似性处于中等相似与极相似之间(0.57~0.86),并且在

施有机肥与半有机肥、无机肥间相似性系数最高(0.86),为极相似,其相似程度最高,主要原因是杂食性中小型土壤动物在土壤中属于优势类群,适应能力较强,其类群在3种施肥方式下相差不大^[17-18]。植食性、捕食性中小型土壤动物的相似度较低,处于极不相似与中等相似之间(0.22~0.57),主要原因是耕地作物仅为大豆,植食性中小型土壤动物食物来源单一,同时,在土壤生态系统中,属于初级消费者的植食性中小型土壤动物易被次级消费者所取食,所以类群减少,继而引起捕食性中小型土壤动物类群减少^[17,21]。腐食性、菌食性中小型土壤动物相似度跨度较大,处于中等不相似与极相似之间(0.27~0.80),主要原因是土壤酶受有机肥影响活性增强,土壤微生物数量增多,腐食性、菌食性中小型土壤动物类群随之增加,而土壤渗透压因无机肥的施入而降低,土壤孔隙度减少,土壤氧含量下降,营养物质缺失,腐食性、菌食性中小型土壤动物类群减少,造成各处理间异质性较高^[19-20]。

4.3 不同施肥方式中小型土壤动物功能类群与环境因子的关系

施肥通过改变土壤理化环境间接影响土壤各功能类群分布^[19]。CCA分析表明,土壤全磷、全氮、pH分别在施有机肥、半有机肥、无机肥下对中小型土壤动物各功能类群结构影响显著。主要原因是有机肥中的磷进入土壤后,一部分被作物吸收,另一部分残留在土壤中,增加了土壤中全磷^[23],土壤中磷的有效性增强促进了作物生长,作物长势好代表土壤中营养物质充分,中小型土壤动物食物来源充足,各功能类群活动性增强,导致土壤全磷对中小型土壤动物各功能类群分布影响明显^[21,23]。施半有机肥时,土壤氮素物质因有机肥与无机肥配施,其吸附作用与固氮作用增强,土壤

全氮增加,而有机肥中大量难分解的有机氮进入土壤,也使土壤中全氮增加^[24],作物根系氮浓度升高促进了中小型土壤动物各功能类群的取食与繁殖,同时,土壤动物构建自身蛋白质和发育需要大量的氮,导致土壤全氮对中小型土壤动物各功能类群分布影响明显^[21]。土壤 pH 通常为土壤动物分布的限制因素,但该研究表明,施无机肥土壤 pH 与腐食性、菌食性、杂食性中小型土壤动物呈正相关,可能是土壤动物适宜在微酸性和中性条件下生存,耕地黑土区由于长期耕作土壤呈微酸性,而无机肥样地的土壤 pH 为 5.13~5.61,与对照组相比,施无机肥对土壤 pH 影响较小,腐食性、菌食性、杂食性中小型土壤动物在其耐受范围内生物量有所增加^[25]。

4.4 结论 中小型土壤动物各功能类群群落特征受 3 种施肥方式影响明显。杂食性中小型土壤动物作为优势功能类群,其群落特征受施肥影响较小。中小型土壤动物各功能类群与土壤全磷、全氮、pH 关系更为密切。施有机肥中小型土壤动物各功能类群数量增加更显著,施适量有机肥,可改善土壤肥力。

参考文献

- [1] 韩晓增,李娜.中国东北黑土地研究进展与展望[J].地理科学,2018,38(7):1032-1041.
- [2] 王文东,红梅,赵巴音那木拉,等.不同培肥措施对黑土区农田中小型土壤动物群落的影响[J].应用与环境生物学报,2019,25(6):1344-1351.
- [3] GRUZDEVA L I, MATVEEVA E M, KOVALENKO T E. Changes in soil nematode communities under the impact of fertilizers[J]. Eurasian soil science, 2007, 40(6):681-693.
- [4] COYLE D R, NAGENDRA U J, TAYLOR M K, et al. Soil fauna responses to natural disturbances, invasive species, and global climate change: Current state of the science and a call to action[J]. Soil biology and biochemistry, 2017, 110:116-133.
- [5] YIN X Q, SONG B, DONG W H, et al. A review on the eco-geography of soil fauna in China[J]. Journal of geographical sciences, 2010, 20(3):333-346.
- [6] FERRIS H, MATUTE M M. Structural and functional succession in the

- nematode fauna of a soil food web[J]. Applied soil ecology, 2003, 23(2):93-110.
- [7] FU S L. A review and perspective on soil biodiversity research[J]. Biodiversity science, 2007, 15(2):109-115.
- [8] WARDLE D A, BARDGETT R D, KLIRONOMOS J N, et al. Ecological linkages between aboveground and belowground biota[J]. Science, 2004, 304(5677):1629-1633.
- [9] 林琳, 郭天媛, 李景科, 等. 大庆草甸草原区大型土壤动物功能类群[J]. 地理研究, 2013, 32(1):41-54.
- [10] 王媛, 王庆贵, 孙元, 等. 土壤动物生态功能与陆地生态系统各环境因子的关系[J]. 中国农学通报, 2020, 36(23):54-59.
- [11] LEHMAN R M, CAMBARDELLA C A, STOTT D E, et al. Understanding and enhancing soil biological health: The solution for reversing soil degradation[J]. Sustainability, 2015, 7(1):988-1027.
- [12] CARDOSO E J B N, VASCONCELLOS R L F, BINI D, et al. Soil health: Looking for suitable indicators. What should be considered to assess the effects of use and management on soil health? [J]. Scientia agricola, 2013, 70(4):274-289.
- [13] 罗漫丽, 兰琴, 王戈, 等. 施肥对农田土壤动物群落结构的影响[J]. 浙江农业学报, 2019, 31(6):946-954.
- [14] 陈晶, 杨帆, 张凌宇, 等. 哈尔滨市呼兰区气候变化特征分析及对马铃薯产量的影响[J]. 南方农业, 2020, 14(36):151-152.
- [15] 尹文英. 中国土壤动物[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [17] 刘姣, 曹四平, 高荣, 等. 退耕还林区不同植被类型土壤动物多样性特征研究[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(1):60-66.
- [18] 王文东, 红梅, 刘鹏飞, 等. 施用有机肥对黑土区农田大型土壤动物群落的影响[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(5):174-184.
- [19] 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.
- [20] 薛娟, 王长庭, 曾璐, 等. 长期施加 N、P 肥对高寒草甸小型土壤节肢动物群落的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(23):9432-9447.
- [21] 庄海峰, 孙明, 谷加存, 等. 施氮肥对落叶松和水曲柳人工林土壤动物群落的影响[J]. 生物多样性, 2010, 18(4):390-397.
- [22] 孔云, 张婷, 李刚, 等. 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[J]. 玉米科学, 2020, 28(2):156-162.
- [23] 宋佳明, 蔡红光, 张秀芝, 等. 施用不同种类有机肥对黑土磷素含量的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2019, 41(6):707-712.
- [24] 孙娟, 谢丽红, 钟文挺, 等. 不同施肥对稻田土壤全氮储量的影响[J]. 四川农业科技, 2019(5):44-46.
- [25] 叶岳, 姜玉霞, 陈华. 大型土壤动物功能类群对小生境环境因子的响应[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(3):253-257.

(上接第 65 页)

- [6] BREJDA J J, KARLEN D L, SMITH J L, et al. Identification of regional soil quality factors and indicators II. Northern Mississippi loess hills and palouse prairie[J]. Soil science society of America journal, 2000, 64(6):2125-2135.
- [7] AHMAD N, HASSAN F U, BELFORD R K. Effect of soil compaction in the sub-humid cropping environment in Pakistan on uptake of NPK and grain yield in wheat (*Triticum aestivum*) L. Compaction[J]. Field crops research, 2009, 110(1):54-60.
- [8] DORAN J W. Soil health and global sustainability: Translating science into practice[J]. Agriculture, ecosystems and environment, 2002, 88(2):119-127.
- [9] ZHAO B Z, CHEN J, ZHANG J B, et al. Soil microbial biomass and activity response to repeated drying-rewetting cycles along a soil fertility gradient modified by long-term fertilization management practices[J]. Geoderma, 2010, 160(2):218-224.
- [10] 李振宇, 黄姚. 广东省垦造水田关键技术探讨[J]. 低碳世界, 2019, 9(7):355-356.
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999:272-288, 292-295.
- [12] 中华人民共和国农业部. 土壤检测第 20 部分: 土壤微团聚体组成的测

- 定: NY/T 1121.20—2008[S]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [13] 乔胜英. 土壤理化性质实验指导书[M]. 武汉: 中国地质大学出版社有限责任公司, 2012:26-31.
- [14] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil science society of America journal, 1980, 44(5):892-898.
- [15] 肖参明, 柯玉诗, 黄继茂, 等. 犁底层容重对水稻生长的影响研究[J]. 广东农业科学, 1996, 23(2):25-28.
- [16] 胡怀舟, 胡邦友, 张绪林, 等. 稻田免耕年限与复耕次数对土壤容重和 水稻生长的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36(10):1-7.
- [17] 张建国, 刘淑珍, 宋述军, 等. 不同土地利用方式对黄土坡地土壤水稳性团聚体和总孔隙度的影响[J]. 山地学报, 2002, 20(S1):119-124.
- [18] 周秀梅. 不同机械化整地技术对稻田土壤理化性质和 水稻产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(14):200-202.
- [19] 马阳, 吴敏, 王艳群, 等. 不同耕作施肥方式对夏玉米氮素利用及土壤容重的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(5):171-176.
- [20] 翟振. 犁底层对作物生产与环境效应的影响及其机制研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017:67-76.
- [21] 陈晓侠. 东北黑土团聚体的结构特征研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2013:20.
- [22] 高惠嫣, 杨路华. 不同质地土壤的水分特征曲线参数分析[J]. 河北农业大学学报, 2012, 35(5):129-132.