文章编号:1000-7601(2020)01-0223-07 **doi**:10.7606/j.issn.1000-7601.2020.01.29

生物有机肥与化肥配施对华北潮土区冬小麦田土壤线虫群落的影响

张 婷[1], 孔 云[1,2], 修伟明[1,2], 李 刚[1], 赵建宁[1], 杨殿林[1], 张贵龙[1], 王丽丽[1]

(1.农业农村部环境保护科研监测所,农业农村部产地环境污染防控重点实验室/天津市农业环境与农产品安全重点实验室,天津 300191;
2.沈阳农业大学植物保护学院,辽宁 沈阳 110866)

摘 要:为了研究华北潮土区生物有机肥与化肥配施对冬小麦田土壤线虫群落结构的影响,在天津市宁河区试验基地设置了单施化肥(A1)、单施生物有机肥(A2)、减量 50%生物有机肥与化肥配施(A3)、常量生物有机肥与化肥配施(A4)、增量 50%生物有机肥与化肥配施(A5)5 个施肥处理。结果表明:整个调查期共鉴定出 6 目、17 科、26 属土壤线虫,食细菌性线虫和植食性线虫在各处理中均为优势营养类群。不同处理的土壤线虫数量为 A4>A5>A3>A2>A1,其中 A4 处理显著高于 A1 处理($P<0.05$)。生物有机肥-化肥配施处理中食细菌性线虫和捕食-杂食性线虫的相对丰度分别提高了 1.67%~7.00%和 1.00%~18.67%,食真菌性线虫和植食性线虫的相对丰度分别降低了 2.33%~12.00%和 0.34%~10.34%。从土壤线虫生态指数来看,优势度指数(λ)和富集指数(EI)不受施肥措施的影响。生物有机肥-化肥配施可增加土壤线虫类群多样性,A5 处理的线虫 WI、MI、SI 和 J 指数分别为 2.85、2.18、60.83 和1.05,均高于其他处理,表明配施过程中增施生物有机肥可丰富土壤线虫食物网结构,提高土壤环境的稳定性和土壤健康程度。生物有机肥-化肥配施在一定程度上促进了线虫的繁殖,提高了线虫种类多样性,并通过增强线虫食物网的稳定性以降低其受干扰程度。

关键词:生物有机肥;化肥;土壤线虫;群落结构;冬小麦田;华北潮土区

中图分类号:S154 **文献标志码**:A

Effects of coupled bio-organic and chemical fertilizers on soil nematode communities in winter wheat field in the fluvo-aquic soil region of Northern China

ZHANG Ting[1], KONG Yun[1,2], XIU Weiming[1,2], LI Gang[1], ZHAO Jianning[1], YANG Dianlin[1], ZHANG Guilong[1], WANG Lili[1]

(1. *Key Laboratory of Original Agro-Environmental Pollution Prevention and Control*, *MARA/Tiajin Key Laboratory of Agro-Environment and Agro-Product Safety*, *Agro-Environmental Protection Institute*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Tianjin* 300191, *China*;
2. *College of Plant Protection*, *Shenyang Agriculture University*, *Shenyang* 110866, *China*)

Abstract: In order to study the effect of different fertilization treatments on soil nematode community in winter wheat field in the fluvo-aquic soil region of Northern China, field experiments with different fertilization treatments were set up in Ninghe district of Tianjin City. Five treatments were implemented including the single application of fertilizer (A1), single application of bio-organic fertilizer (A2), reduced by 50% of the amount of bio-organic fertilizer and fertilizer application (A3), equal application of bio-organic fertilizer and fertilizer application (A4), and incremental 50% bio-organic fertilizer combined with chemical fertilizer (A5). The results showed that a total of 6 orders, 17 families and 26 genera of soil nematodes were identified in the whole investigation period, among which bacterivores nematodes and plant parasitic nematodes were dominant nutritional groups in all treatments. The

收稿日期:2018-01-14 **修回日期**:2019-03-17

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201503121-04);国家重点研发计划支持项目(2016YFD0201009)

作者简介:张婷(1993-),女,内蒙古人,硕士,研究方向为农业生物多样性与生态农业。E-mail:zhangting931020@163.com

通信作者:修伟明(1978-),男,副研究员,硕士生导师,主要从事农业生物多样性与生态农业研究。E-mail:xiuweiming@caas.cn

number of soil nematode worms under different treatments was A4>A5>A3>A2>A1, among which A4 was significantly higher than A1 ($P<0.05$). The relative abundance of bacterivores nematodes and predator-omnivorous nematodes increased in the order of 1.67%~7.00% and 1.00%~18.67%, respectively, and the number of fungal nematodes and plant parasitic nematodes increased by 2.33%~12.00% and 0.34%~10.34%. From the soil nematode ecological index, the dominance index (λ) and enrichment index (EI) are not affected by fertilization measures. Bio-organic fertilizer-fertilizer application can increase soil nematode diversity. The WI, MI, SI and J indexes of A5 treated nematodes were higher than other treatments, indicating that the application of bio-organic fertilizer in the application process enriched the soil nematode food network structure and improve soil environmental stability and soil health. It was seen that the combination of bio-organic fertilizer and chemical fertilizer promoted the propagation of nematodes to a certain extent, improved the diversity of nematode species, and reduced the degree of interference of nematode by enhancing the stability of its food network.

Keyword: bio-organic fertilizer; chemical fertilizer; soil nematodes; community structure; winter wheat field; fluvo-aquic soil

化肥长期过量和不合理使用,已给农业生态环境带来了诸多不利的影响[1]。随着人们对生态环境以及农业可持续发展的关注,有机肥被越来越多地应用到农业生产中。在农田管理措施中,有机肥的施用可以增加土壤有机质含量,提高土壤肥力,增加作物产量,改善农产品质量[2]。研究表明,长期施用有机肥对土壤理化性质有积极影响,有利于微生物和线虫群落的发展[3]。陆海飞等[4]研究表明长期有机无机肥配施可显著提高土壤细菌多样性,并改变土壤细菌和真菌的群落结构,提高土壤酶活性,因而提高了农田生态系统的生产力并对生态系统健康有改善作用。生物有机肥兼具了有机肥和微生物肥料的待征,具有较为全面的营养元素,并且其内含有一定量的功能微生物,能够促进土壤养分转化,提高土壤速效养分含量,改善土壤微生物环境[5-8]。

农业施肥措施在改变土壤理化性质的同时也影响着土壤动物的群落特征[9-10]。陆地生态系统中,土壤动物是土壤有机质分解和养分矿化等生态过程的主要调节者[11]。线虫以植物和微生物为食,调节土壤食物网中的养分循环和能量流动[12]。线虫作为土壤中数量繁多,种类丰富,分布广泛的土壤动物,是土壤中重要的生物类群,也可作为一种衡量土壤生态系统复原力指标的代表性物种[13-14]。因而,监测土壤线虫对于环境的反应有助于更好地了解不同施肥措施对土壤食物网及生态系统产生的影响。

本研究在华北典型潮土区玉米-小麦轮作田中设置不同量生物有机肥与化肥配施处理,研究不同量生物有机肥与化肥配施对潮土区土壤线虫群落结构的影响,以期为农田土壤有机培肥和健康管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于天津市宁河区(117°71′E,39°48′N),属温带大陆性季风气候,年均气温 11.2℃,年均降水量 642 mm,无霜期 210 d。田间试验开始于 2015 年 10 月,为冬小麦-夏玉米旱地轮作体系,前茬玉米秸秆不还田,小麦秸秆全还田。供试土壤为盐化潮土,为华北耕作区的典型代表性土壤类型。供试土壤的基本理化性质为:全氮 1.02 g·kg^{-1},全磷 0.80 g·kg^{-1},速效磷 79.90 mg·kg^{-1},有机质17.85 g·kg^{-1},碱解氮 61.63 mg·kg^{-1},pH 值 7.28[15]。

1.2 试验设计

试验共设置 5 个处理:A1(对照,单施化肥),A2(单施生物有机肥)、A3(减量 50%生物有机肥-化肥配施)、A4(常量生物有机肥-化肥配施)和 A5(增量 50%生物有机肥-化肥配施)。每个处理 3 次重复,试验小区共 15 个,小区面积为 15 m×24 m=360 m^2。各小区施肥量见表 1。试验中使用的肥料尿素(含 N 量 46.4%)为正元牌,河北阳煤正元化工集团有限公司生产;磷肥(含 P_2O_5量 12%)为九华山牌,铜陵市九华山化工有限公司生产;钾肥(含 K_2SO_4量 20%)为村田牌,天津市北辰区刘快庄工业区生产;生物有机肥(含 NPK 总养分 8%,有机质含量 20%)为镶播王牌,江阴市联业生物科技有限公司生产。生物有机肥、纯氮量 60%尿素、磷肥和钾肥做基肥在整地前一次性施入,纯氮量 40%尿素在小麦苗期作为追肥施入。

1.3 土壤样品采集

2017 年 6 月小麦收割前,按照随机、等量和多点混合的原则,在各处理小区内用直径为 5 cm 的土

表 1　各试验小区施肥量

Table 1　The fertilizer amounts applied in each plot

处理 Treatment	生物有机肥/(kg·hm^{-2}) Bio-organic fertilizer	N/(kg·hm^{-2}) 基肥 Base fertilizer	N/(kg·hm^{-2}) 追肥 Top dressing	P_2O_5/(kg·hm^{-2})	K_2O/(kg·hm^{-2})
A1	0	55.68	37.12	49.26	12.35
A2	200	0.00	0.00	0.00	0.00
A3	100	55.68	37.12	49.26	12.35
A4	200	55.68	37.12	49.26	12.35
A5	300	55.68	37.12	49.26	12.35

钻,采集 0~20 cm 表层土壤,每小区重复 3 次,随机选取 12 点采样,同一处理小区的土壤充分混匀形成一个混合样品,剔除石砾和植物残体等杂质,装入无菌封口袋置于冰盒中带回实验室,土壤样品部分用于线虫分离,其余部分土壤样品风干后用于土壤基本理化性质的测定。

1.4　测定方法

1.4.1　土壤理化性质的测定　土壤 pH 值使用 MP511 型 pH 计测定,水土比 2.5∶1;土壤有机质测定采用重铬酸钾-浓硫酸外加热氧化法测定;土壤速效磷测定采用碳酸氢钠-钼锑抗比色法;土壤全氮使用流动分析仪测定。具体步骤参照《土壤农化学分析》[16]。

1.4.2　土壤线虫的分离与鉴定　采用浅盘法[17-18]分离土壤线虫:称取 50.0 g 鲜土置于浅盘中的滤纸上,25℃避光培养 48 h,通过 500 目筛(孔径 25 μm)分离获得线虫样品,60℃杀死后保存于 4%福尔马林溶液中。用体式显微镜对线虫进行计数,最后统一将线虫个体数量转换成 100 g 干土中的数量。同时,每个样本随机选择 100 条线虫,根据尹文英[19]的线虫形态分类鉴定法,在荧光倒置显微镜的高倍镜(200×)下进行分类(属)鉴定,总数不满 100 条的全部鉴定。根据线虫形态特征进行营养类型分类,根据线虫的生活史确定其 c-p 值[20]。

1.5　土壤线虫群落分析

根据土壤线虫的分类结果计算其生态指数[21-22]。线虫丰度以每 100 g 干土中线虫总数表示。各营养类群相对丰度分别为每 100 g 土中植食性线虫(Plant-parasites,PP)、食细菌性线虫(Bacterivores,BF)、食真菌性线虫(Fungivores,FF)和杂食-捕食性线虫(Omnivores-predators,OP)占线虫总量的百分比。

(1)Shannon-Wiener 多样性指数(H'):

$$H' = -\sum p_i \ln p_i \quad (i = 1,2,3,\cdots,S)$$

式中,p_i 是样本中第 i 个分类单元中个体数占线虫总个体数量的比例。

(2)Pielon 均匀度指数(J):

$$J = H/\ln S$$

式中,H 为 Shannon-Wiener 多样性指数;S 为鉴定分类单元的数目。

(3)富集指数(EI):

$$EI = 100\times(e/(e+b))$$

式中,b 主要指 c-p 值为 2 的 Ba 和 Fu 类群;e 主要指 c-p 值为 1 的 Ba 和 Fu 类群。

(4)结构指数(SI):

$$SI = 100\times(s/(s+b))$$

式中,s 包括 c-p 值为 3、4、5 的 Ba、Fu、Om 和 c-p 值为 2、3、4、5 的 Ca 类群。

(5)线虫通路指数(NCR):

$$NCR = N_B/(N_B+N_F)$$

式中,N_B 指食细菌性线虫的数量;N_F 指食真菌性线虫的数量。

(6)瓦斯乐斯卡指数(WI):

$$WI = (N_F+N_B)/N_{PP}$$

式中,N_F 为食真菌性线虫数量;N_B 为食细菌性线虫数量;N_{PP} 为植食性线虫数量。

(7)植食性线虫成熟度指数(PPI):

$$PPI = \sum v_i f_i$$

式中,v_i 为根据自由生活线虫在生态演替中的不同生活策略分别赋予的 $c-p$;f_i 为第 i 种线虫的个体数占群落总个体数的比例。

1.6　数据分析

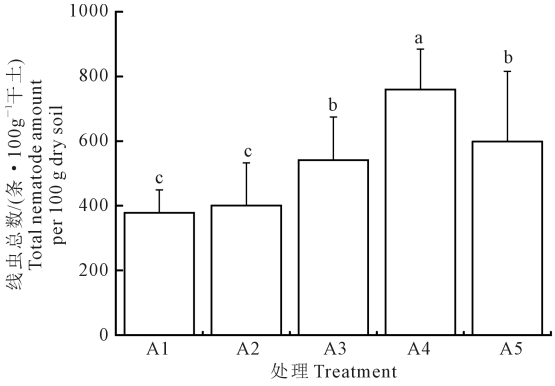
运用 SPSS 17.0 对小麦生长期相关指标数据进行方差分析(One-way ANOVA),采用 LSD 法进行差异显著性检验($P<0.05$);运用 Origin 9.1 软件作图。

2　结果与分析

2.1　不同施肥处理对土壤线虫数量的影响

不同施肥处理土壤线虫数量在 378~760 条·100g^{-1}干土之间,各处理的线虫总数由低到高的顺序为:A1<A2<A3<A5<A4(图 1)。生物有机肥-化肥配施的处理(A3、A4、A5)线虫数量显著高于单施化肥(A1)和单施生物有机肥(A2)处理($P<0.05$)。

根据土壤线虫营养类群划分结果来看(图 2),食细菌性线虫(BF)和植食性线虫(PP)对各施肥处理中线虫总数起决定性作用,食真菌性线虫(FF)、杂食-捕食性线虫(OP)所占的比例较低。A3、A4、A5 处理的食细菌性线虫数量均高于 A1 处理,而食真菌性线虫的相对丰度变化与食细菌性线虫相反,且 A4、A5 处理的食真菌性线虫数量与 A1 处理间差异显著($P<0.05$)。植食性线虫在土壤线虫的营养类群中占23.33%~48.67%。随着生物有机肥施用量的逐渐增加,植食性线虫相对丰度呈逐渐下降趋势。杂食-捕食性线虫随着生物有机肥施用量的升高,相对丰度呈逐渐上升趋势,但各施肥处理间的差异均不显著。如上所述,线虫的营养类群中食细菌性线虫和植食性线虫的数量在很大程度上影响着线虫的总体数量。食细菌性线虫和杂食-捕食性线虫的相对丰度在整体上呈上升趋势,食真菌性线虫和植食性线虫的相对丰度在整体上呈现下降趋势。



注:不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different letters indicate significant difference at $P<0.05$ level.

图 1 不同施肥处理土壤线虫总数

Fig.1 Numbers of soil nematode in different fertilization treatments

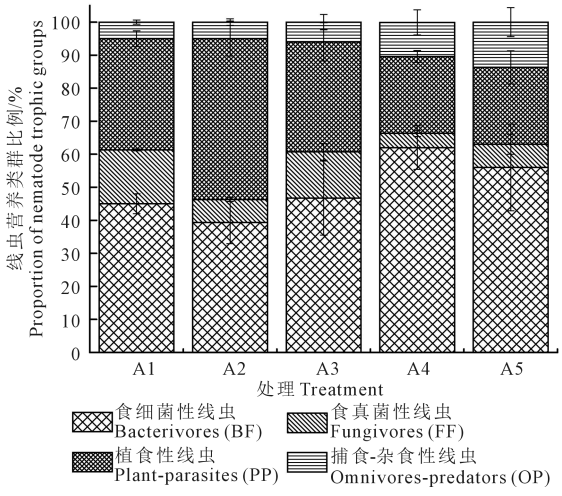


图 2 不同施肥处理土壤线虫营养类群数量

Fig.2 Numbers of soil nematode trophic groups in different fertilization treatments

2.2 不同施肥处理对土壤化学性质与线虫群落组成的影响

A4、A5 处理的全氮、有机质和速效磷值均显著高于单施化肥的 A1 处理($P<0.05$),全氮、有机质也显著高于单施生物有机肥的 A2 处理($P<0.05$)。各处理的 pH 值分布在 7.694~7.864。从结果可知,生物有机肥的施用改善了土壤的理化性状,随着生物有机肥配施量的增加土壤肥力也在逐渐增加(表 2)。

不同施肥处理下,土壤线虫不同营养类群对土壤化学性质的响应不同(表 3)。土壤 pH 值的变化对不同施肥处理的土壤线虫群落组成没有显著影响。土壤食细菌性线虫与土壤全氮、土壤有机质含量呈显著的正相关性;食真菌性线虫与土壤全氮、土壤有机质、速效磷之间呈显著负相关;植食性线虫与土壤全氮、土壤有机质含量呈显著的负相关;捕食-杂食性线虫与土壤有机质呈显著正相关。由此可见,增加土壤全氮、有机质的含量不仅有助于食细菌性线虫和捕食-杂食性线虫的繁殖,而对食真菌性和植食性线虫群落具有明显的抑制作用。

表 2 各施肥处理土壤化学性质

Table 2 Chemical properties of soil in different fertilization treatments

处理 Treatment	pH	全氮 Total N /(g·kg⁻¹)	有机质 Organic matter /(g·kg⁻¹)	速效磷 Available P /(mg·kg⁻¹)
A1	7.860±0.030a	0.883±0.037c	15.698±0.375b	42.055±2.405c
A2	7.807±0.038a	0.927±0.022bc	16.267±0.214b	90.661±3.232a
A3	7.694±0.047b	0.938±0.045bc	15.154±0.684b	38.676±4.828c
A4	7.864±0.014a	1.022±0.015ab	18.021±0.243a	71.894±2.842b
A5	7.694±0.032b	1.045±0.025a	19.114±0.161a	96.626±5.102a

注:同列不同字母代表处理间差异显著($P<0.05$).

Note: Different letters in the same column indicate significant difference at $P<0.05$.

表 3 各营养类群线虫与土壤化学指标的相关关系

Table 3 The correlation between the nutritive groups of nematode and chemical indexes of soil

	pH	全氮 Total N	有机质 Organic matter	速效磷 Available P
食细菌性线虫(BF) Bacterivores	0.089	0.678**	0.591*	0.129
食真菌性线虫(FF) Fungivores	0.020	-0.564*	-0.708**	-0.751**
植食性线虫(PP) Plant-parasites	0.013	-0.690**	-0.577*	0.035
捕食-杂食性线虫(OP) Omnivores-predators	-0.237	0.486	0.580*	0.363

注:*表示相关显著($P<0.05$);**表示相关极显著($P<0.01$).

Note: * indicates significant correlation at the 0.05 level; ** indicates significant correlation at the 0.01 level.

2.3　不同施肥处理对土壤线虫群落组成的影响

整个调查期共鉴定出土壤线虫 6 目、17 科、26 属(表 4),其中食细菌性线虫的种类最多,为 11 属,植食性线虫 6 属,杂食-捕食性线虫 5 属,食真菌性线虫 4 属。各施肥处理共有的土壤线虫有拟丽突属(*Acrobeloides*)、无咽属(*Alaimus*)、板唇属(*Chiloplacus*)、真头叶属(*Eucephalobus*)、盆咽属(*Panagrolaimus*)、中杆属(*Mesorhabditis*)、短矛属(*Doryllius*)、滑刃属(*Aphelenchoides*)、螺旋属(*Helicotylenchus*)、散香属(*Boleodorus*)、裸矛属(*Psilenchus*)和孔咽属(*Aporcelaimus*)。食细菌性线虫和植食性线虫在各施肥处理中均为优势营养类群,杂食-捕食性线虫只在 A4 和 A5 处理中为优势营养类群。不同施肥处理的线虫优势属也不尽相同,A1 和 A3 处理的优势属为无咽属和螺旋属,A2 处理的优势属为无咽属、螺旋属和裸矛属,A4 处理的优势属为无咽属和中杆属,A5 处理的优势属为无咽属、真头叶属、裸矛属和孔咽属。无咽属为各施肥处理共有的优势属。由此可见,生物有机肥和化肥的配施增加了土壤线虫优势属的数量,有利于杂食-捕食性线虫的繁殖。

2.4　不同施肥处理对土壤线虫多样性参数的影响

由表 5 可知,各施肥处理的土壤线虫优势度指数无显著差异。A5 处理的线虫多样性指数和均匀度指数高于其他处理,与单施有机肥的 A2 处理有显著差异($P<0.05$)。各施肥处理的 $WI>1$,A4、A5 与 A2 处理存在显著差异($P<0.05$),表明土壤中食微线虫数量大于植食性线虫数量,可见生物有机肥与化肥配施更有助于食微线虫的繁殖。A3、A4 和 A5 的 *MI* 均高于单施化肥 A1 处理和单施有机肥 A2 处理,表明生物有机肥与化肥配施可减小外界环境对土壤稳定性的影响程度。富集指数(*EI*)在各处理之间均小于 50 且无显著差异。A4、A5 处理的结构指数(*SI*)均大于 50,且 A5 处理明显高于 A1 处理($P<0.05$),表明增量配施生物有机肥使土壤线虫的食物网更为复杂,提高了土壤的复原能力。线虫通路比值(*NCR*)可以用于表示土壤腐屑食物网的分解途径,各处理 *NCR* 分布在 0.733~0.934 之间,表明各施肥处理主要依靠细菌途径分解土壤有机物质。

3　讨　论

施肥和轮作是农业生产的两项基本措施,由于增加了对农田土壤的扰动,进而对土壤线虫区系产生了影响,通过对线虫群落结构探究的结果可用以指示土壤生态系统受干扰的情况[23]。现有研究大多表明有机肥的施用能够增加土壤线虫的总体数量[10, 24-26],提高食细菌性线虫、食真菌性线虫和杂食-捕食性线虫的数量,降低植食性线虫的数量[2, 27-28]。本研究发现土壤线虫群落结构由于受不同施肥处理的影响发生不同变化,生物有机肥与化肥配施显著提高了土壤肥力和土壤线虫总体数量,并对土壤线虫群落的生态指数和土壤线虫营养类群的数量产生了影响。

施肥可改善土壤性质,有机肥的施用可使土壤肥力增加。本研究表明生物有机肥-化肥配施可提高土壤有机质、全氮和速效磷的含量,并且其含量随着生物有机肥配施量的增加而增加,同时土壤全氮、有机质含量增加有助于食细菌线虫和捕食-杂食性线虫的繁殖,而对食真菌性和植食性线虫群落

表 4　不同施肥处理对土壤线虫群落组成及丰富度的影响

Table 4　Composition and abundance of the soil nematode communities in different treatments

类群(属) Group (genus)	*c-p*	优势度 Dominance				
		A1	A2	A3	A4	A5
BF		+++	+++	+++	+++	+++
拟丽突属 *Acrobeloides*	2	++	++	++	++	++
无咽属 *Alaimus*	4	+++	+++	+++	+++	+++
丽突属 *Acrobeles*	2		++		++	++
头叶属 *Cephalobus*	2	++	++	++	++	
鹿角唇属 *Cervidellus*	2	++	+			
板唇属 *Chiloplacus*	2	++	++	++	++	++
真头叶属 *Eucephalobus*	2	++	++	+	++	+++
盆咽属 *Panagrolaimus*	1	++	++	++	++	++
中杆属 *Mesorhabditis*	1	++	++	++	+++	++
小杆属 *Rhabditis*	1	++	++		+	++
连胃属 *Chronogaster*	2			+		++
FF		+++	++	+++	++	++
短矛属 *Doryllius*	4	++	++	++	+	++
真滑刃属 *Aphelenchus*	2	++	++			+
滑刃属 *Aphelenchoides*	2	++	++	++	++	++
茎属 *Ditylenchus*	2	+	++	++		++
PP		+++	+++	+++	+++	+++
螺旋属 *Helicotylenchus*	3	+++	+++	+++	++	++
短体属 *Pratylenchus*	3	++				+
矮化属 *Tylenchorhynchus*	3	++	++		+	
散香属 *Boleodorus*	2	++	++	++	++	++
裸矛属 *Psilenchus*	2	++	+++	++	++	+++
短体长针属 *Longidorella*	4	++	++	++	++	
OP		++	++	++	+++	+++
真矛属 *Eudorylaimus*	5	+	+		++	++
孔咽属 *Aporcelaimus*	4	++	++	++	++	+++
中矛线属 *Mesodorylaimus*	5	++		+	+	
拟矛线属 *Dorylaimoides*	4		+	+	+	++
三孔属 *Tripyla*	3		++	++		

注:+++:丰度>10%,优势属;++:1%≤丰度≤10%,常见属;+:RA<1%,稀有属。样品重复数 $n=3$.

Note: +++: RA>10%, dominant genera; ++: 1%≤ RA ≤10%, common genera; +: RA<1%, rare genera. Number of sample repetitions equal to 3.

表5 不同施肥处理土壤线虫生态指数变化

Table 5 Ecological indices of the soil nematode community in different treatments

生态指数 Ecological index	处理 Treatment				
	A1	A2	A3	A4	A5
多样性指数(H') Shannon-Wiener index	2.619±0.044ab	2.402±0.146c	2.459±0.066ab	2.489±0.109ab	2.856±0.200a
优势度指数(λ) Dominance index	0.093±0.002a	0.140±0.038a	0.108±0.017a	0.103±0.017a	0.121±0.011a
均匀度指数(J) Evenness index	0.908±0.003b	0.833±0.029b	0.891±0.041b	0.898±0.029b	1.048±0.080a
富集指数(EI) Enrichment index	42.807±6.124a	43.168±7.186a	45.014±4.959a	45.287±3.705a	48.888±7.544a
线虫通路指数(NCR) Nematode channel Ratio	0.733±0.015d	0.844±0.024bc	0.769±0.028cd	0.934±0.015a	0.884±0.033ab
瓦斯乐斯卡指数(WI) Wasilewska index	1.855±0.230ab	1.012±0.271b	1.994±0.497ab	2.876±0.250a	2.854±0.657a
成熟度指数(MI) Maturity index	1.684±0.100b	1.217±0.146c	1.727±0.062b	1.960±0.017ab	2.184±0.149a
结构指数(SI) Structure index	42.386±0.799b	43.871±11.074ab	49.650±3.032ab	51.270±2.937ab	60.832±1.221a

注:不同字母代表处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different letters indicate significant difference at $P<0.05$.

产生明显的抑制作用。施肥在影响土壤理化性质的同时也在影响土壤线虫群落。从生物有机肥的施用量来看,生物有机肥的添加可促进土壤线虫总数的增加,常量生物有机肥与化肥配施更有利于土壤线虫的繁殖,而增加生物有机肥配施量后反而使线虫总体数量有所下降。Elfstrand 等[26]的研究结果表明土壤微生物对有机肥的响应取决于有机肥的养分含量和质量。刘婷等[29]研究不同肥源与化肥配施对稻田土壤线虫群落的影响得出,有机肥与化肥配施能够显著增加土壤线虫的总数。这可能是由于生物有机肥的营养更全面,促进了化肥转化,提高了化肥利用率,使土壤中营养物质增加,促进了线虫的繁殖,但大量的生物有机肥施用使线虫优势属占据主导地位,抑制了其它线虫种群的繁殖。

土壤线虫不同营养类群对施肥措施的响应程度不同。本研究中生物有机肥-化肥配施处理中食细菌性线虫和杂食-捕食性线虫的数量有所增加,而食真菌性线虫和植食性线虫的数量相对减少。其中,常量生物有机肥-化肥配施中食细菌性线虫的增加和食真菌性线虫的减少最为明显,生物有机肥配施量增加时杂食-捕食性线虫数量有所提高,而植食性线虫数量随之下降,这与江春等[27]研究结果相似。叶成龙等[2]对麦地土壤线虫群落结构的研究显示,有机物料(秸秆或有机肥)与化肥配合施用可以显著增加土壤线虫数量,并且对食细菌性线虫的繁殖起到促进作用,对植食性线虫起到一定的抑制作用。朱同彬等[30]发现与常规施肥相比,优化施肥能够提高土壤线虫数量,且对食细菌性线虫促进尤为明显,而对食真菌性和植食性线虫起到一定抑制作用。Nahar 等[28]试验表明有机肥能够增加土壤食细菌性线虫数量,降低食植性线虫数量。这可能由于生物有机肥同时具有生物肥和有机肥的功效,一方面增加了土壤的有机物质,为微生物的繁殖提供了营养物质,促进了微生物的活动,使食微线虫种群增加,进而使得捕食-杂食性线虫的食源更加充足,有利于其繁殖。另一方面生物有机肥内部具有一些功能微生物,其代谢活动产生的生长素、维生素等活性物质可以被植物直接吸收[31],并且特定功能微生物添加的生物有机肥可使植物抗病虫害的能力提高[32]。由于有机物质投入而激活的微生物所产生的代谢产物可能对植食性线虫有毒害作用,并且自由生活线虫密度的增加势必会竞争植食性线虫的生态位,因此导致植食性线虫数量有所下降[33-34]。

线虫的多种生态指数可有效反映出土壤线虫群落的多样性和结构差异,以及土壤受干扰的程度。从本研究结果来看,土壤线虫对不同施肥处理表现出了不同程度的响应,表明土壤线虫可以揭示土壤受干扰的程度,从而对土壤健康状态作出指示。生物有机肥-化肥配施可提高土壤线虫的多样性指数(H')和均匀度指数(J)。各施肥处理线虫通路比值(NCR)均大于0.7,表明各施肥处理主要依靠细菌途径分解土壤有机物质,细菌的活跃程度增加导致食细菌性线虫数量的增加,同时也利于杂食-捕食性线虫的繁殖。瓦斯乐斯卡指数(WI)反映了土壤线虫群落组成和土壤的健康程度,其值越大,表明土壤食微线虫丰度越高,土壤健康程度越

高[35]。成熟指数(*MI*)可以表明土壤环境所受的干扰程度,指数较高代表线虫群落更为稳定[36]。增量配施生物有机肥(A5)使得土壤线虫的富集指数(*EI*)、瓦斯乐斯卡指数(*WI*)、结构指数(*SI*)和成熟度指数(*MI*)均高于其他处理,说明在其配施方式下土壤线虫群落更为稳定,土壤环境所受的干扰程度较小,提高了土壤环境的稳定性和土壤健康程度。Li 等[37]研究得出有机肥能够提高线虫群落的成熟度,降低土壤环境受干扰程度。Liu 等[14]研究得出土壤线虫物种丰富度、结构指数(*SI*) 和杂食-捕食性线虫丰度随有机肥施用量的增加而提高,而在无有机肥处理中下降,说明有机肥可以缓冲土壤胁迫,维持土壤食物网功能。基于土壤线虫不同生态指数提供的有关群落演替的有效信息,通常能够预测和解释由于环境变化导致的土壤线虫群落结构变化[38],这种群落结构的变化有助于对线虫群落组成、环境变化和生态系统功能之间关系的深入了解[39]。

4　结　论

本试验研究得出不同施肥处理对土壤线虫总体数量、营养类群组成以及线虫生态指数均有显著影响。配施生物有机肥提高了土壤肥力,增加了土壤线虫总体数量,特别是常量生物有机肥-化肥配施使食细菌性线虫和杂食-捕食性线虫数量有较明显的提升,而抑制了食真菌性线虫和植物寄生性线虫的繁殖。结合线虫生态指数分析可知,配施生物有机肥可以优化土壤线虫群落结构,其中增量 50% 生物有机肥-化肥配施处理增加了土壤线虫群落的多样性,降低了土壤环境所受的干扰程度,提高了土壤环境的稳定性和土壤健康程度。土壤线虫对不同施肥方式的积极响应,可揭示其群落受干扰的程度,从而对土壤健康状态做出指示。

参 考 文 献:

[1] 胡诚,曹志平,迎春,等.土壤线虫群落对施用 EM 生物有机肥的响应[J].生态学报,2010,30(18):5012-5021.

[2] 叶成龙,刘婷,张运龙,等.麦地土壤线虫群落结构对有机肥和秸秆还田的响应[J].土壤学报,2013,50(5):997-1005.

[3] Zhang Z Y, Zhang X K, Xu M G, et al. Responses of soil micro-food web to long-term fertilization in a wheat-maize rotation system [J]. Applied Soil Ecology, 2016,9(8):56-64.

[4] 陆海飞,郑金伟,余喜初,等.长期无机有机肥配施对红壤性水稻土微生物群落多样性及酶活性的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(3):632-643.

[5] 张余莽,周海军,张景野,等.生物有机肥的研究进展[J].吉林农业科学,2010,35(3):37-40.

[6] 李小炜,孙权,白春梅.宁夏中部干旱带玉米地施用有机肥和化肥对土壤理化性质的影响及耕地速效养分需求规律的研究[J].陕西农业科学,2017,63(6):21-26.

[7] 罗兴录,岑忠用,谢和霞,等.生物有机肥对土壤理化、生物性状和木薯生长的影响[J].西北农业学报,2008,17(1):167-173.

[8] 赵红,袁培民,吕贻忠,等.施用有机肥对土壤团聚体稳定性的影响[J].土壤,2011,43(2):306-311.

[9] Cutz-Pool L Q, Palacios-Vargas J G, Castao-Meneses G, et al. Edaphic Collembola from two agroecosystems with contrasting irrigation type in Hidalgo State, Mexico[J]. Applied Soil Ecology, 2007,36(1):46-52.

[10] Liang W J, Lou Y L, LI Q, et al. Nematode faunal response to long-term application of nitrogen fertilizer and organic manure in Northeast China [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(5):883-890.

[11] 李琪,梁文举,姜勇.农田土壤线虫多样性研究现状及展望[J].生物多样性,2007,15(2):134-141.

[12] Liu T, Whalen J K, Shen Q, et al. Increase in soil nematode abundance due to fertilization was consistent across moisture regimes in a paddy rice upland wheat system [J]. European Journal of Soil Biology, 2016,7(2):21-26.

[13] 林琳,王琳,张雪萍,等.不同施肥处理方式下土壤线虫群落结构的研究[J].国土与自然资源研究,2013,3(32):90-92.

[14] Liu T, Chen X Y, Hu F, et al. Carbon-rich organic fertilizers to increase soil biodiversity: Evidence from a meta-analysis of nematode communities [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2016, 232:199-207.

[15] 侯萌瑶.华北两熟区不同培肥措施对小麦养分吸收和产量的影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2017.

[16] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000:8-30.

[17] Weaver R W, Angle S, Bottomley P, et al. Methods of soil analysis, Part 2: microbiological and biochemical properties, Soil Science Society of America Book Series [M]. Madison: Soil Science Society of America, 1994:459-487.

[18] Griffiths B S, Bengough A G, Neilson R, et al. The extent to which nematode communities are affected by soil factors-a pot experiment [J]. Nematology, 2002, 4(8):943-952.

[19] 尹文英.中国土壤动物检索图鉴[M].北京:科学出版社,1998:51-89.

[20] Ferris H, Bongers T, De Goede Rgm. A framework for soil food web diagnostics: extension of the nematode faunal analysis concept [J]. Applied Soil Ecology, 2001, 18(1):13-29.

[21] Yeates G W. Variation in soil nematode diversity under pasture with soil and year [J] .Soil Biology and Biochemistry, 1984, 16(2):95-102.

[22] Yeates G W, Bongers T, De Goede R, et al. Feeding habits in soil nematode families and Genera: an outline for soil ecologists [J]. Journal of Nematology, 1993, 25(3):315-331.

[23] 刘艳军,张喜林,高中超,等.长期施肥对土壤线虫群落结构的影响[J].中国农学通报,2011,27(21):287-291.

[24] Hu C, Qi Y C. Effect of compost and chemical fertilizer on soil nematode community in a Chinese maize field [J]. European Journal of Soil Biology, 2010,46(3-4):230-236.

[25] Li Q, Liang W J. Responses of nematode communities to different land uses in an aquic brown soil[J]. Frontiers of Biology in China, 2008,3(7): 518-524.

(下转第 236 页)