

DOI: 10.11766/trxb201212220522

# 麦地土壤线虫群落结构对有机肥和秸秆还田的响应<sup>\*</sup>

叶成龙<sup>1</sup> 刘婷<sup>1</sup> 张运龙<sup>2</sup> 张俊伶<sup>2</sup> 沈其荣<sup>1</sup> 李辉信<sup>1†</sup>

(1 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

(2 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100194)

**摘要** 通过猪粪有机肥的施用和秸秆还田, 研究其对农田土壤线虫数量、属的种类及群落结构的影响。田间试验处理为 CK(不施肥对照)、HF(施化肥)、ZH(猪粪堆肥+化肥)、JHB(秸秆+化肥+秸秆伴侣)、ZHJ(猪粪堆肥+化肥+秸秆)、ZDH(猪粪堆肥有机无机复合肥+化肥) 6 个处理。结果表明: 在 6 个施肥处理中共鉴定出 4 目 11 科 22 属线虫, 其中食细菌线虫 9 属, 食真菌线虫 5 属, 植食线虫 4 属, 杂食-捕食线虫 4 属。JHB、ZHJ 和 ZDH 处理的土壤线虫数量显著高于 CK 和 HF 处理, 而 HF 与 CK 处理之间没有显著差异; 化肥、有机肥和秸秆配施可以增加食细菌线虫的丰度, 抑制植食线虫垫刃属和螺旋属的繁殖; 除了 ZDH 外, 其他 4 个处理的植食线虫丰度明显低于 CK。JHB、ZHJ 和 ZDH 的线虫通路比值(*NCR*)显著高于 CK, 表明有机管理的农田土壤腐屑食物网的分解途径主要依靠细菌分解途径。CK、JHB、ZHJ 和 ZDH 的成熟指数(*MI*)显著高于 HF, 表明单施化肥对土壤环境干扰较大。多样性指数(*H'*)、优势度指数( $\lambda$ )、均匀度指数(*J*) 和瓦斯乐斯卡指数(*WI*) 在 6 个处理中均没有显著差异。在 6 个施肥处理中, 均以 c-p 2 类群的土壤线虫比例最高, 其次是 c-p 3-5, c-p 1 类群比例最低。通过线虫营养类群、群落结构及生态指数综合分析得出, JHB 和 ZHJ 为最佳施肥方式。

**关键词** 有机肥; 秸秆还田; 线虫多样性; 群落结构

**中图分类号** S154.38 **文献标识码** A

在农田生态系统中, 土壤动物的重要性往往被大家忽视<sup>[1-3]</sup>, 现在人们已经认识到, 土壤动物对于土壤中营养物质的转化、储存和释放以及对土壤微生物的调节和土壤理化性质的改变均发挥着积极的作用<sup>[4-7]</sup>。土壤线虫作为土壤动物中分布广泛和数量丰富的后生动物之一, 具有世代周期短、对环境变化反应敏感、耐受性高、较容易分离等特点, 因此土壤线虫可以被作为农田管理措施改变的敏感指示生物<sup>[8-9]</sup>; 同时由于其具有种类和营养类群多样性, 在土壤碎屑食物网中占有重要地位<sup>[10-11]</sup>, 并且参与调控土壤中有机质的分解和养分的循环, 线虫的生态指数可提供有关土壤生态系统中独特的信息, 所以研究土壤线虫的群落结构也有助于揭示土壤中的一些生态过程<sup>[12-13]</sup>。

在农田管理措施中, 通过施加有机肥具有增加土壤有机质含量, 提高土壤肥力, 增加作物产量, 改善农产品质量等作用, 随着人类生存环境和农业可

持续发展越来越受到人们的关注, 在现代农业生产中, 更加注重有机肥的施用, 国内关于有机肥施用对农田土壤影响的研究主要集中在土壤的理化性质和微生物学等方面, 对土壤动物影响的研究相对较少。但是近年来, 有关施用有机肥对农田土壤线虫的研究开始越来越多<sup>[14-18]</sup>, 然而有关有机肥、化肥和秸秆混合施用对土壤线虫群落影响的报道很少。

本试验设置化肥、猪粪有机肥和秸秆的单独施用及混合施用等试验处理, 明确有机肥、无机肥和有机无机相结合的农田管理措施对土壤线虫群落结构和种类多样性的影响, 找出对土壤自由生活线虫及植物寄生线虫进行合理调控的施肥措施, 并按照其对农田生态系统服务功能的贡献进行管理, 为农田生态系统的健康运行和高效的施肥方式提供一些参考依据。

\* 农业部行业公益性项目(201103004)资助

† 通讯作者, E-mail: huixinli@njau.edu.cn

作者简介: 叶成龙(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤生态学研究。E-mail: ye\_chenglong@163.com

收稿日期: 2012-12-22; 收到修改稿日期: 2013-03-25

# 1 材料与方法

## 1.1 试验地概况

试验设在中国农业大学曲周长期定位试验站进行(36°52'N, 115°01'E)。曲周试验站位于河北省邯郸市曲周县,属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均气温 13.1℃,无霜期年平均 201 d,年平均降雨量为 556.2 mm,年蒸发量 1 841 mm。试验田的种植制度为冬小麦—夏玉米轮作,试验地土壤类型为潮土,质地为砂壤。

田间试验开始于 2010 年 10 月开始,试验小区规格为 5 m × 10 m,各小区之间间隔 1 m,外围保护行 5 m,试验设置 6 个施肥处理,每个处理 4 次重复,田间试验采用随机区组设计。施肥措施见表 1(施肥措施按农业部公益性行业项目“利用有机(类)肥料调控我国土壤微生物区系关键技术研究”的要求统一设计)。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 土壤样品采集

采样时间为 2012 年 6 月,小麦收获的前一天。在每个试验小区内,采用 S 形采样法,用土钻钻取 0 ~ 20cm 深度的表层土,每个小区随机选取 6 ~ 8 个取样点,土样混合放入自封袋,带回实验室,挑出土壤中大的根系和掰碎大的土块后,一部分土壤样品放入 4℃ 冰箱保存用于土壤线虫指标的测定;另一部分土壤样品置于室外,自然风干,然后过 20 目和 100 目筛,用于土壤理化指标的测定。

### 1.2.2 土壤理化指标测定

土壤理化性质的测定参照文献[19],主要测定的指标和方法如下:土壤含水量采用烘干法;pH 采用酸度计测定(水土比 2.5:1);有机质采用重铬酸钾加热法;全氮采用半微量开氏法;速效磷采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法;速效钾采用乙酸铵浸提—火焰光度法。不同施肥处理的土壤理化性质见表 2。

表 1 不同试验处理的施肥措施

Table 1 Designing of the treatments in the experiment

处理 Treatments	施肥措施 Fertilization measures
CK	对照(完全不施肥)
HF	纯 NPK 化肥(100% 当地用量),尿素 259.9 kg hm <sup>-2</sup> 、过磷酸钙 750.0 kg hm <sup>-2</sup> 、硫酸钾 199.9 kg hm <sup>-2</sup>
ZH	猪粪堆肥(N:2.3%, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> :2.9%, K <sub>2</sub> O:1.2%, H <sub>2</sub> O:29.1%, 有机质:454 g kg <sup>-1</sup> ) 6 t hm <sup>-2</sup> + 纯 NPK 化肥(50% 当地用量)
JHB	秸秆全量还田 + 纯 NPK 化肥(100% 当地用量) + 秸秆伴侣(由腐熟微生物组成,包含纤维素分解真菌和纤维素分解细菌等)300 kg hm <sup>-2</sup>
ZHJ	猪粪堆肥 6 t hm <sup>-2</sup> + 纯 NPK 化肥(50% 当地用量) + 秸秆全量还田
ZDH	猪粪堆肥有机无机复合肥(N:12.2%, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> :4.1%, K <sub>2</sub> O:4.1%, 有机质:161 g kg <sup>-1</sup> ) 3.6 t hm <sup>-2</sup> + 纯 NPK 化肥(30% 当地用量)

注:CK,不施肥;HF,NPK 化肥(100% 当地用量),尿素 259.9 kg hm<sup>-2</sup>、过磷酸钙 750.0 kg hm<sup>-2</sup>、硫酸钾 199.9 kg hm<sup>-2</sup>;ZH,猪粪 6 t hm<sup>-2</sup> + 50% NPK;JHB,秸秆全量还田 + 100% NPK + 秸秆伴侣 300 kg hm<sup>-2</sup>;ZHJ,猪粪 6 t hm<sup>-2</sup> + 50% NPK + 秸秆全量还田;ZDH,猪粪堆肥有机无机复合肥 3.6 t hm<sup>-2</sup> + 30% NPK。下同 × Note: CK, no fertilizer; HF, chemical fertilizer (100% local dosage), urea 259.9 kg hm<sup>-2</sup>, superphosphate 750.0 kg hm<sup>-2</sup>, potassium sulfate 199.9 kg hm<sup>-2</sup>; ZH, composted pig manure 6 t hm<sup>-2</sup> and 50% NPK; JHB, straw and 100% NPK and straw mate 300 kg hm<sup>-2</sup>; ZHJ, composted pig manure 6 t hm<sup>-2</sup> and 50% NPK and straw; ZDH, composted pig manure based organic inorganic complex fertilizer 3.6 t hm<sup>-2</sup> and 30% NPK. The same below

表 2 不同处理的土壤理化性质

Table 2 Physicochemical properties of the soils in different treatments

施肥处理 Fertilizer treatments	pH	有机质 Organic matter(g kg <sup>-1</sup> )	全氮 TotalN(g kg <sup>-1</sup> )	速效磷 Available P(mg kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Available K(mg kg <sup>-1</sup> )
CK	8.11 ± 0.02a	12.55 ± 1.81a	0.87 ± 0.02b	13.46 ± 1.15c	115.1 ± 11.5d
HF	8.06 ± 0.04a	13.28 ± 0.82a	0.93 ± 0.03ab	42.13 ± 1.15b	141.0 ± 10.3cd
ZH	8.09 ± 0.03a	14.23 ± 0.47a	0.99 ± 0.02a	44.90 ± 2.70b	237.7 ± 20.3b
JHB	8.04 ± 0.01ab	14.37 ± 1.44a	1.02 ± 0.01a	33.81 ± 2.84b	174.7 ± 15.2c
ZHJ	8.09 ± 0.04a	16.08 ± 0.91a	0.94 ± 0.05ab	34.01 ± 1.69b	163.8 ± 1.0cd
ZDH	7.96 ± 0.01b	13.52 ± 1.32a	1.00 ± 0.03a	64.78 ± 6.09a	312.1 ± 20.9a

注:同列不同小写字母表示各处理间差异显著(p < 0.05)。下同 Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference between treatments at 0.05 level. The same below

**1.2.3 土壤线虫的分离鉴定及线虫生态指数评价** 土壤线虫的分离采用改进的浅盘法<sup>[20-21]</sup>。分离出的线虫在体视镜下进行线虫计数。并且根据土壤的含水量,将土壤线虫数量换算成每 100g 干土中线虫的数量。然后在每个样品中随机挑取至少 100 条线虫进行制片,并参照文献[22-23],在生物显微镜下鉴定到属。根据线虫头部的形态学特征和取食生境分为以下 4 个营养功能类群:食细菌类群(*Bacterivores*)、食真菌类群(*Fungivores*)、植物寄生类群(*Plant-parasites*)、杂食/捕食类群(*Omnivores-predators*)。根据线虫的食性和生活策略(r-对策和 k-对策)对线虫赋予其对应的 c-p (colonizer-persister) 值<sup>[24]</sup>。

采用多种线虫生态指数<sup>[25-26]</sup>对土壤线虫的多样性和群落结构进行评价,即:

(1) Shannon-Wiener 多样性指数:  $H' = - \sum P_i \ln P_i$ ,  $P_i$  为第  $i$  个分类单元中个体占线虫总个体数量的比例;

(2) 优势度 (Dominance):  $\lambda = \sum P_i^2$ ,  $P_i$  为第  $i$  个分类单元中个体占线虫总个体数量的比例;

(3) 均匀度 (Evenness):  $J = H' / \ln S$ ,  $H'$  为 Shannon-Wiener 多样性指数,  $S$  为线虫的分类单元数;

(4) 线虫通路比值 (NCR):  $NCR = B / (B + F)$ , 其中  $B$  和  $F$  分别代表食细菌和食真菌的线虫数量;

(5) 瓦斯乐斯卡指数 (WI):  $WI = (B + F) / PP$ , 其中  $PP$  代表植食线虫数量;

(6) 成熟指数 (MI):  $MI = \sum v(i) \times f(i)$ , 其中  $v(i)$  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 值,  $f(i)$  为某一科/属在自由生活线虫 (不包括植食性线虫) 总数中所占的比重;

(7) 群落相似性指数 (Jaccard)<sup>[27]</sup>:  $C_j = j / (a + b - j)$ ,  $j$  为所比较的两个群落共有物种的种数,  $a$  和  $b$  分别为群落 A 和群落 B 的物种数。

### 1.3 数据统计分析

应用 SPSS 16.0 软件对数据进行方差分析 (one-way ANOVA), 并用 LSD 法进行差异显著性检验 ( $p < 0.05$ ), 采用 OriginPro8.5.1 软件作图。采用多种线虫生态指数来比较土壤线虫多样性和群落结构的差异性。

## 2 结果

### 2.1 土壤线虫群落组成

本试验共鉴定出 4 目 11 科 22 属线虫 (见表 3), 其中食细菌线虫 9 属, 食真菌线虫 5 属, 植食线

虫 4 属, 杂食-捕食线虫 4 属。6 个施肥处理中共有的线虫属为盆咽属 (*Panagrolaimus*)、头叶属 (*Cephalobus*)、丽突属 (*Acrobeles*)、拟丽突属 (*Acrobeloides*)、茎属 (*Ditylenchus*)、滑刃属 (*Aphelenchoides*)、真滑刃属 (*Aphelenchus*)、螺旋属 (*Helicotylenchus*)、矮化属 (*Tylenchorhynchus*)、微矛线属 (*Microdorylaimus*) 和孔咽属 (*Aporcelaimus*)。拟丽突属 (*Acrobeloides*) 为所有处理的优势属, 且在每个处理中所占的比例均较高, 在 HF 中甚至占到 41.85%, 螺旋属 (*Helicotylenchus*) 为 CK、HF、ZH、ZHJ 和 ZDH 的优势属, 真滑刃属 (*Aphelenchus*) 为 ZH 和 JHB 的优势属, 盆咽属 (*Panagrolaimus*) 为 JHB 的优势属, 矮化属 (*Tylenchorhynchus*) 为 ZDH 的优势属。垫咽属 (*Tylencholaimus*) 只存在于 ZDH 中, 盘咽属 (*Discolaimus*) 只存在于 JHB 中, 原杆属 (*Protorhabditis*) 只存在于 ZH 和 ZHJ 中, 在 CK 中没有发现, 它们可能是有机肥施用带进来的外来种, 也有可能是有机肥和秸秆的施入, 增加了这些属的丰度; 植食线虫垫刃属 (*Tylenchus*) 只存在于 CK 和 HF 中, 在其他 4 个施用有机物料的处理中没有发现, 原因有可能是有机物料的施用抑制了垫刃属 (*Tylenchus*) 的繁殖, 与 CK 相比, 植食性的螺旋属 (*Helicotylenchus*) 在其他 5 各处理中丰度也有明显的下降。以上说明施用有机物料可以降低植食线虫的丰度, 此研究结果与 Nahar 等<sup>[28]</sup> 和刘艳军等<sup>[18]</sup> 的研究结果相一致。

### 2.2 土壤线虫数量和营养类群结构

试验各施肥处理的线虫数量见图 1。土壤线虫的数量在 1 611 ~ 3 281 条  $100g^{-1}$  干土之间, 由图 1 可知, 各处理之间土壤线虫的数量高低为 JHB  $\approx$  ZHJ  $\approx$  ZDH  $>$  ZH  $>$  HF  $\approx$  CK, JHB、ZHJ 和 ZDH 的土壤线虫数量显著高于 ZH, ZH 显著高于 HF 和 CK ( $p < 0.05$ )。添加有机肥和秸秆处理的土壤线虫总数显著高于 CK, 而 HF 中线虫数量与 CK 没有显著差异, 原因可能是有机物料 (有机肥和秸秆) 施入, 使土壤中有更丰富的营养物质和食物来源, 刺激线虫的大量繁殖<sup>[29-30]</sup>。

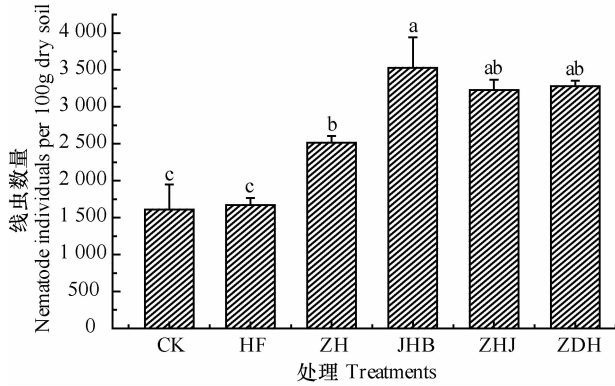
6 个施肥处理中, 均以食细菌线虫所占的比例最大, JHB 和 ZHJ 中食细菌线虫的比例明显高于 CK, 在 4 大营养类群占 60% 左右, 其他 4 个处理为 40% 左右; 其次是食真菌线虫和植食线虫, 其中 CK 和 ZDH 的植食线虫比例高于食真菌线虫, HF、ZH、JHB 和 ZHJ 的食真菌线虫比例高于植食线虫。杂食-捕食线虫在 6 个处理中比例均最小, 在 4 大营养类群占 10% ~ 20% 左右 (见图 2)。

表 3 不同处理土壤线虫的群落组成及丰富度

Table 3 Composition and abundance of the soil nematode communities in different treatments

类群(属) Taxa (genus)	c-p	CK			HF			ZH			JHB			ZHU			ZDH		
		丰度 Abundance (%)	优势度 Dominance	丰度 Abundance (%)	优势度 Dominance	丰度 Abundance (%)	优势度 Dominance	丰度 Abundance (%)	优势度 Dominance	丰度 Abundance (%)	优势度 Dominance	丰度 Abundance (%)	优势度 Dominance	丰度 Abundance (%)	优势度 Dominance	丰度 Abundance (%)	优势度 Dominance		
食细菌线虫 <i>Bacterial-feeders</i>																			
原杆属 <i>Protorhabditis</i>	1	41.11		58.64		43.34		58.85		55.38		43.52							
中杆属 <i>Mesorhabditis</i>	1	0.83	+	0.34	+	0.43	+	0.91	+	0.37	+								
盆咽属 <i>Panagrolaimus</i>	1	2.70	++	0.32	+	0.86	+	11.24	+++	2.67	++	1.29	++						
板唇属 <i>Chiloplacus</i>	2	3.42	++	9.84	++	6.39	++	1.49	++	1.17	++	2.28	++						
头叶属 <i>Cephalobus</i>	2	0.48	+	2.66	++	0.41	+	0.24	+	5.72	++	8.08	++						
真头叶属 <i>Eucephalobus</i>	2	2.53	++	1.37	++	0.86	+			0.27	+	0.32	+						
鹿角唇属 <i>Cervidellus</i>	2	2.73	++	2.26	++	2.57	++	1.87	++	1.97	++	3.89	++						
丽突属 <i>Acrobeles</i>	2	28.43	+++	41.85	+++	27.54	+++	36.65	+++	39.87	+++	27.66	+++						
拟丽突属 <i>Acrobeloides</i>	2	15.66		26.93		19.26				16.68		16.28							
食真菌线虫 <i>Fungal-feeders</i>																			
茎属 <i>Ditylenchus</i>	2	6.41	++	5.42	++	8.35	++	6.56	++	7.99	++	4.24	++						
滑刃属 <i>Aphelenchoides</i>	2	0.83	+	2.68	++	1.28	++	1.25	++	2.14	++	0.32	+						
真滑刃属 <i>Aphelenchus</i>	2	8.79	++	5.95	++	17.30	+++	10.01	+++	5.75	++	9.13	++						
丝尾垫刃属 <i>Filenchus</i>	2	5.19	++	1.61	++		++	1.44	++	0.80	++	2.26	++						
垫咽属 <i>Tylencholaimus</i>	4																		
植食线虫 <i>Plant-parasites</i>	29.56	19.41		21.85		13.19				14.18		29.44							
垫刃属 <i>Tylenchus</i>	2	0.21	+	0.32	+														
螺旋属 <i>Helicotylenchus</i>	3	25.05	+++	15.48	+++	13.37	+++	8.77	++	10.00	+++	13.68	+++						
短体属 <i>Pratylenchus</i>	3	0.41	+	0.65	+	2.53	++	0.58	+			1.64	++						
矮化属 <i>Tylenchorhynchus</i>	3	3.89	++	2.96	++	5.95	++	3.84	++	4.18	++	14.12	+++						
捕食-杂食线虫 <i>Predators-Omnivores</i>	8.11	6.29		7.89		8.72				13.77		10.75							
微矛线属 <i>Microdorylaimus</i>	4	6.18	++	2.28	++	1.67	++	4.31	++	6.22	++	5.21	++						
拟矛线属 <i>Dorylaimoides</i>	4	0.62	+	0.32	+	0.43	+	0.24	+	0.53	+		+						
孔咽属 <i>Aporcelaimus</i>	5	1.31	++	3.69	++	5.79	++	2.83	++	7.02	++	5.53	++						
盘咽属 <i>Discolaimus</i>	5					1.34	++		++										

注: +++ : 表示丰度 > 10%, 为优势属; ++ : 表示 1% ≤ 丰度 ≤ 10%, 为常见属; + : 表示丰度 < 1%, 为稀有属 Note: +++ : Abundance > 10%, dominant genera; ++ : 1% ≤ Abundance ≤ 10%, common genera; + : Abundance < 1%, rare genera



注: 不同小写字母表示各处理间差异显著 ( $p < 0.05$ )

Note: Different lowercase letters indicate significant difference between the treatments at 0.05 level

图 1 不同处理对线虫数量的影响

Fig. 1 Effect of treatment on population of nematodes

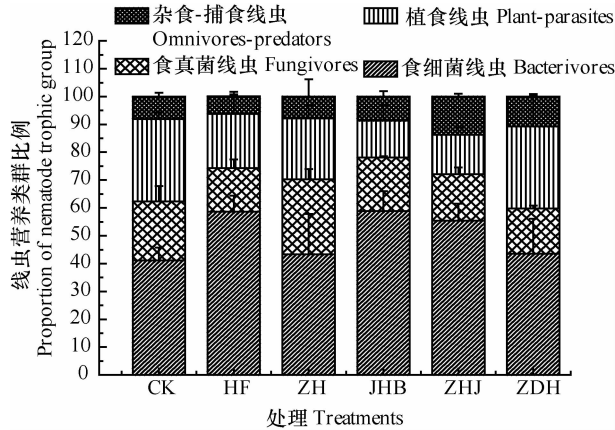


图 2 不同处理对线虫营养类群的影响

Fig. 2 Effect of treatment on nematode trophic group

### 2.3 土壤线虫群落相似性分析

6 个处理的土壤线虫群落相似性指数见表 4。通过群落相似性分析,可以比较不同施肥处理之间线虫属组成的差异程度<sup>[31]</sup>,Jaccard 值越大,群落之间的相似性越大。其中 ZH 和 ZDH 的相似性最高,其 Jaccard 值为 0.944, HF 和 ZDH 的相似性最低,其 Jaccard 值为 0.667。CK 与 HF 的相似性高于 CK 与其他五个处理的相似性, HF 与 ZH、ZHJ、JHB 和 ZDH 的相似性低于 ZH、ZHJ、JHB 和 ZDH 四者之间的相似性,说明施用化肥和施用有机肥对土壤线虫群落改变的程度不同,本试验可以看出有机肥的施用对线虫群落的改变较大。

### 2.4 土壤线虫群落结构评价

利用线虫生态指数,可以用来评价线虫多样性和群落结构特征(见表 5)。多样性指数( $H'$ )、优势

度指数( $\lambda$ )和均匀度指数( $J$ )可以用来表征土壤线虫的多样性特征<sup>[26]</sup>。多样性指数( $H'$ )越大,表明土壤线虫种类越丰富,从表 6 可知,CK 的  $H'$  最高, HF 的最低,但是 6 个处理的  $H'$  没有达到显著差异 ( $p < 0.05$ ); 优势度指数( $\lambda$ )值越小,均匀度指数( $J$ )越大,表明土壤线虫属的丰度分布比较均匀,土壤线虫群落结构比较稳定,6 个处理的  $\lambda$  和  $J$  均没有达到显著差异水平 ( $p < 0.05$ )。

线虫通路比值( $NCR$ )<sup>[32]</sup>可以用于表示土壤腐屑食物网的分解途径, $NCR$  为 0,表明完全依靠真菌分解途径; $NCR$  为 1,则表明完全依靠细菌分解途径,各处理  $NCR$  均在 0.5 以上,表明各处理主要依靠细菌途径分解土壤有机物质,其中 JHB、ZHJ 和 ZDH 的  $NCR$  显著高于 CK,表明有机管理的农田土壤腐屑食物网的分解途径主要依靠细菌分解途径,而 HF、ZH、JHB、ZHJ 和 ZDH 的  $NCR$  差异不显著。瓦斯乐斯卡指数( $WI$ )用于反映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,除了 ZDH 的  $WI$  低于 CK 之外,其他处理的  $WI$  均大于 CK, JHB 和 ZHJ 的  $WI$  要明显高于其他 4 个处理,但差异不显著。成熟指数( $MI$ )<sup>[25]</sup>是根据线虫的群落结构特征评价人类的活动对线虫群落结构的影响,进而可以表明土壤环境所受的干扰程度,成熟指数越低,表明土壤环境受到干扰程度越大, HF 的成熟指数最低,除 ZH 外,与其他 5 个处理到达显著差异 ( $p < 0.05$ ),说明单施化肥对土壤线虫群落的干扰程度最大。

### 2.5 土壤线虫功能类群

按照线虫的生活史对策,可以将线虫分为 5 个功能类群<sup>[26]</sup>: c-p 1,世代周期短,产卵量大,在食物充足条件下繁殖迅速,代谢快,耐受环境压力;c-p 2,世代周期较短,卵量大,比较耐受环境压力;c-p 3,世代时间较长,对环境压力较为敏感;c-p 4,世代周期长,对环境压力敏感;c-p 5,世代周期很长,产卵量小,对环境压力极为敏感。由 De Goede<sup>[33]</sup>的 c-p 线虫类群三角图分析结果显示(图 3),6 个处理中均以 c-p 2 类群的土壤线虫占的比例最高,在各处理中均占到 80% 以上;其次是 c-p 3-5 类群土壤线虫,在各处理中所占的比例在 25% ~ 50% 左右,其中 ZDH 和 HF 的 c-p 3-5 类群高于其他 4 个处理,在 JHB 中最低;c-p 1 类群线虫在所有处理中比例均最低, JHB 和 ZHJ 的 c-p 1 类群线虫比例高于其他 4 个处理。

表 4 6 种处理土壤线虫群落的 Jaccard 相似性

Table 4 Jaccard similarity of the nematode communities associated of the six treatments

	CK	HF	ZH	JHB	ZHJ	ZDH
CK	1					
HF	0.850	1				
ZH	0.842	0.714	1			
JHB	0.800	0.762	0.750	1		
ZHJ	0.800	0.762	0.842	0.800	1	
ZDH	0.789	0.667	0.944	0.700	0.700	1

表 5 不同处理土壤线虫群落的生态指数

Table 5 Ecological indices of the soil nematode communities of the different treatments

线虫生态指数 Nematode ecological indices	多样性指数( $H'$ ) Shannon- Wiener index	优势度指数( $\lambda$ ) Dominance index	均匀度指数( $J$ ) Evenness index	线虫通路比值 ( $NCR$ ) Nematode channel Ratio	瓦斯乐斯卡指数 ( $WI$ ) Wasilewska index	成熟指数 ( $MI$ ) Maturity index
CK	2.06 ± 0.22a	0.18 ± 0.04a	0.79 ± 0.02a	0.52 ± 0.01b	2.31 ± 0.80a	1.82 ± 0.07a
HF	1.93 ± 0.22a	0.24 ± 0.07a	0.73 ± 0.04a	0.64 ± 0.05ab	3.43 ± 0.83a	1.52 ± 0.12b
ZH	2.12 ± 0.04a	0.16 ± 0.01a	0.80 ± 0.01a	0.65 ± 0.06ab	3.48 ± 1.22a	1.76 ± 0.10ab
JHB	1.99 ± 0.13a	0.21 ± 0.05a	0.74 ± 0.01a	0.75 ± 0.01a	5.72 ± 2.28a	1.83 ± 0.04a
ZHJ	2.04 ± 0.20a	0.20 ± 0.04a	0.76 ± 0.04a	0.77 ± 0.04a	5.49 ± 1.66a	2.03 ± 0.01a
ZDH	2.13 ± 0.13a	0.16 ± 0.01a	0.82 ± 0.01a	0.72 ± 0.05a	2.24 ± 1.21a	1.88 ± 0.06a

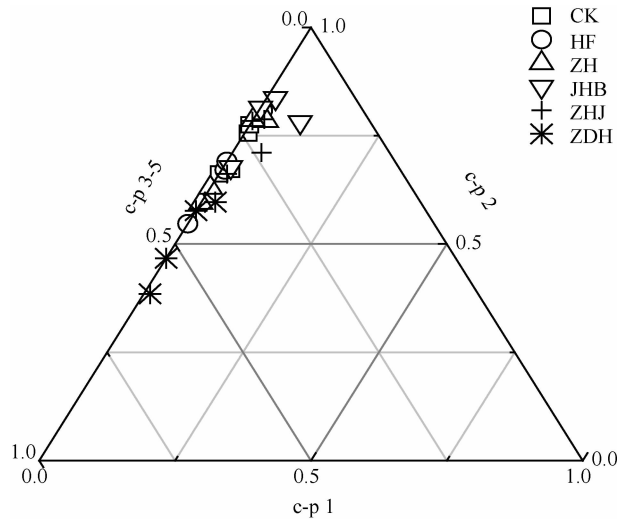


图 3 不同处理对线虫功能类群分布影响

Fig.3 Effect of treatment on distribution of nematode functional groups

### 3 讨 论

本试验中,每个处理土壤线虫的数量均在 1 600 条 100g<sup>-1</sup>干土以上,最高的达到 3 200 多条 100g<sup>-1</sup>干土,总共鉴定出 22 属线虫,在数量上高于、但在线虫属

的类群上低于同一地区的相关报道<sup>[34-35]</sup>。试验的各处理间线虫的数量差异比较明显,采用有机施肥措施处理的线虫数量,尤其是 JHB、ZHJ 和 ZDH 显著高于 HF 和 CK( $p < 0.05$ ),而 JHB、ZHJ 和 ZDH 之间线虫数量差异不显著,说明对农田进行有机管理可以促进土壤线虫的繁殖,本试验结果与前人的研究结果相一致<sup>[17, 28]</sup>。在 6 个处理中,均以常见线虫属占据了每个处理中线虫群落的主体,其次是稀有线虫属,优势线虫属最少。

食细菌线虫在 HF、JHB、ZHJ 中占的比例要明显高于 CK,这可能是由于施肥改善了土壤中的养分状况,从而使以食细菌线虫为食物来源的微生物数量增加所致<sup>[36]</sup>,其中食细菌线虫优势属拟丽突属(*Acrobeloides*) 在 HF、JHB 和 ZHJ 中的丰度明显高于 CK, DuPont 等<sup>[37]</sup>的研究结果也表明有机农业系统的优势线虫类群为食细菌线虫;HF 的食细菌线虫数量也明显高于 CK,刘艳军等<sup>[18]</sup>的研究结果也表明者 NPK 混施也可以增加食细菌线虫的丰度, Zhang 等<sup>[38]</sup>的研究结果表明施用 NK 和 NP 肥可以增加食细菌线虫丰度,但此结果与胡诚等<sup>[15]</sup>的研究结果相异。本试验中, HF、ZH、JHB 和 ZHJ 中的植食线虫丰度明显低于 CK,此结果与江春等<sup>[17]</sup>的研

究结果有相似之处,而王雪峰等<sup>[39]</sup>的研究表明施用有机肥增加了植食线虫的丰度,施用化肥降低了植食线虫的丰度。ZDH 中植食线虫丰度大于 CK,这是由于 ZDH 中的螺旋属 (*Helicotylenchus*) 丰度虽然低于 CK,但是由于矮化属 (*Tylenchorhynchus*) 的丰度增加,所以 ZDH 的植食线虫丰度没有下降。植食线虫垫刃属 (*Tylenchus*) 只在 CK 和 HF 中发现,可能 ZH、JHB、ZHJ 和 ZDH 的有机施肥组合抑制了垫刃属 (*Tylenchus*) 的繁殖。杂食-捕食线虫在所有处理中的比例均最低,本试验中施用有机肥处理的杂食-捕食线虫的数量要高于 CK,原因有可能是有机肥施用可增加土壤中原生动物、线虫等的数量,增加杂食-捕食线虫的食物来源<sup>[17]</sup>。

通过线虫群落相似性分析,本试验中化肥、有机肥和秸秆的配合施用对线虫群落的改变程度相对较高。c-p 2 类群线虫在所有处理中的占的比例均最高,说明土壤中主要以耐受性较强的线虫类群为主,王雪峰等<sup>[39]</sup>也得出有机肥和无机肥单施及配施均以 c-p 2 类群线虫为主,JHB 和 ZHJ 的 c-p 1 类群线虫比例高于其他 4 个处理,有可能是有机肥和秸秆施用增加了土壤线虫的食物来源,使 c-p 1 类群的线虫大量繁殖。采用多种线虫的生态指数可以很好地反映不同处理间土壤线虫多样性和群落结构的差异程度。本文主要采用了  $H'$ 、 $\lambda$ 、 $J$ 、 $NCR$ 、 $WI$ 、 $MI6$  种生态指数。从本试验得出,6 个施肥处理的线虫多样性指数 ( $H'$ )、优势度指数 ( $\lambda$ ) 和均匀度指数 ( $J$ ) 均没有显著的差异,这可能与试验实施的时间较短有关,随试验时间的推移,这些指标可能会发生分异,江春等<sup>[17]</sup>的研究结果表明长期施用有机肥会增加  $H'$  降低  $\lambda$ , Hu 和 Qi<sup>[34]</sup> 的研究结果表明不施肥、有机肥和化肥处理之间的  $H'$  没有显著差异。在线虫营养结构方面,与 CK 相比,所有施肥措施均增加了  $NCR$  和  $WI$ ,特别是有机肥、化肥和秸秆混施处理及化肥和秸秆混施处理增加得更为显著,表明有机施肥措施明显促进食细菌线虫并抑制植食线虫的繁殖;由  $MI$  得出,有机肥、化肥和秸秆混施处理及化肥和秸秆混施处理可以明显降低土壤环境受到干扰的程度,说明秸秆、化肥和有机肥混合施用不仅可以使土壤食物网健康运行,而且可以保持土壤环境的稳定性。

在线虫数量方面,JHB、ZHJ 和 ZDH 之间没有显著差异,但显著高于 CK 和 HF;在线虫营养类群方面,JHB 和 ZHJ 的食细菌线虫丰度明显高于 ZDH 且植食线虫丰度明显低于 ZDH;综合线虫生态指数得

出,JHB 和 ZHJ 的土壤环境状况更加稳定健康。因此,秸秆还田、化肥和秸秆伴侣配施组合 (JHB) 与猪粪有机肥、化肥和秸秆还田组合 (ZHJ) 为本试验的最佳施肥组合。

## 4 结 论

综上所述,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,并且对食细菌线虫的繁殖起到促进作用,对植食线虫起到一定的抑制作用,同时结合线虫群落结构及生态指数分析可知,化肥、有机肥和秸秆的配合施用,可以优化原土线虫的群落结构,降低土壤环境受干扰的程度,改善土壤的环境状况,使土壤生态系统向稳定健康的方向发展。

## 参 考 文 献

- [1] Yeates G W, Bongers T. Nematode diversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1999, 74: 113—135
- [2] 李琪, 梁文举, 姜勇. 农田土壤线虫多样性研究现状及展望. *生物多样性*, 2007, 15(2): 134 - 141. Li Q, Liang W J, Jiang Y. Present situation and prospect of soil nematode diversity in farmland ecosystems (In Chinese). *Biodiversity Science*, 2007, 15(2): 134—141
- [3] 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. Song L H, Wu H T, Wu D H. Soil fauna ecology in China cropland ecosystems: Research progress (In Chinese). *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(12): 2898—2906
- [4] Freckman D W. Bacterivorous nematodes and organic matter decomposition. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1988, 24: 195—217
- [5] 苏永春, 勾影波, 王立新. 农田土壤动物和微生物与生物化学动态关系的研究. *生态学杂志*, 2004, 23(3): 134—137. Su Y C, Gou Y B, Wang L X. Relationship between soil fauna and microorganisms and the development of biochemistry characters in farmlands (In Chinese). *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(3): 134—137
- [6] 毛小芳, 李辉信, 龙梅, 等. 不同食细菌线虫取食密度下线虫对细菌数量、活性及土壤氮素矿化的影响. *应用生态学报*, 2005, 16(6): 1112—1116. Mao X F, Li H X, Long M, et al. Effects of bacteria-feeding nematode at its different density on bacterial number, bacterial activity and soil nitrogen mineralization (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(6): 1112—1116
- [7] 朱永恒, 李克中, 陆林. 根际土壤动物及其对植物生长的影响. *生态学杂志*, 2012, 31(10): 2688—2693. Zhu Y H, Li K Z, Lu L. Rhizosphere soil fauna and its effects on plant growth: A review (In Chinese). *Chinese Journal of Ecology*,

- 2012, 31(10): 2688—2693
- [ 8 ] Ferris H, Matute M M. Structural and functional succession in the nematode fauna of a soil food web. *Applied Soil Ecology*, 2003, 23: 93—110
- [ 9 ] Liang W J, Lavian I, Pen-Mouratov S, et al. Diversity and dynamics of soil free-living nematode populations in a Mediterranean agroecosystem. *Pedosphere*, 2005, 15(2): 204—215
- [ 10 ] Wardle D A. Impacts of disturbance on detritus food webs in agroecosystems of contrasting tillage and weed management practice. *Advances in Ecological Research*, 1995, 26: 105—185
- [ 11 ] Neher D A. Role of nematodes in soil health and their use as indicators. *Journal of Nematology*, 2001, 33: 161 - 168
- [ 12 ] Bongers T, Bongers M. Functional diversity of nematodes. *Applied Soil Ecology*, 1998, 10: 239—251
- [ 13 ] Yeates G W. Nematodes as soil indicators: functional and biodiversity aspects. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, 37: 199—210
- [ 14 ] 梁文举, 张万民, 李维光, 等. 施用化肥对黑土地区线虫群落组成及多样性产生的影响. *生物多样性*, 2001, 9(3): 237—240. Liang W J, Zhang W M, Li W G, et al. Effect of chemical fertilizer on nematode community composition and diversity in the Black Soil Region (In Chinese). *Biodiversity Science*, 2001, 9(3): 237—240
- [ 15 ] 胡诚, 曹志平, 白娅舒, 等. 长期不同施肥措施对土壤线虫群落的影响. *生态与农村环境学报*, 2007, 23(3): 31—35. Hu C, Cao Z P, Bai Y S, et al. Effects of long-term fertilization on nematode community (In Chinese). *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2007, 23(3): 31—35
- [ 16 ] 王雪峰, 苏永中, 杨荣. 黑河中游绿洲不同开垦年限农田土壤线虫群落特征. *应用生态学报*, 2010, 21(8): 2125—2131. Wang X F, Su Y Z, Yang R. Characteristics of soil nematode community along an age sequence of sandy desert soil cultivation in a marginal oasis of middle reaches of Heihe River (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(8): 2125—2131
- [ 17 ] 江春, 黄菁华, 李修强, 等. 长期施用有机肥对红壤旱地土壤线虫群落的影响. *土壤学报*, 2011, 48(6): 1235—1241. Jiang C, Huang J H, Li X Q, et al. Responses of soil nematode community to long-term application of organic manure in upland red soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(6): 1235—1241
- [ 18 ] 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. *中国农学通报*, 2011, 27(21): 287—291. Liu Y J, Zhang X L, Gao Z C, et al. Effects of long-term fertilization on nematode community structure (In Chinese). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(21): 287—291
- [ 19 ] 鲍士旦. 土壤农化分析. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25 - 109. Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (In Chinese). 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 25—109
- [ 20 ] Robert M, John J F. Effect of extraction method on perceived composition of the soil nematode community. *Applied Soil Ecology*, 2004, 27: 55—63
- [ 21 ] 毛小芳, 李辉信, 陈小云, 等. 土壤线虫三种分离方法效率比较. *生态学杂志*, 2004, 23(3): 149—151. Mao X F, Li H X, Chen X Y, et al. Extraction efficiency of soil nematodes by different methods (In Chinese). *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(3): 149—151
- [ 22 ] 尹文英, 胡圣豪, 沈温芬, 等. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社, 1998: 51—89. Yin W Y, Hu S H, Shen W F, et al. Pictorial keys to soil animals of China (In Chinese). Beijing: Science Press, 1998: 51—89
- [ 23 ] Bongers T. *De Nematoden Van Nederland*. Utrecht: Stichting Uitgeverij Koninklijke Nederlandse Natuurhistorische Vereniging, 1988: 53—382
- [ 24 ] Yeates G W, Bongers T, De Goede R G M, et al. Feeding habits in nematode families and genera: An outline for soil ecologists. *Nematology*, 1993, 25: 315—331
- [ 25 ] Bongers T. The maturity index: An ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition. *Oecologia*, 1990, 83: 14—19
- [ 26 ] 李玉娟, 吴纪华, 陈慧丽, 等. 线虫作为土壤健康指示生物的方法及应用. *应用生态学报*, 2005, 16(8): 1541—1546. Li Y J, Wu J H, Chen H L, et al. Nematodes as bioindicator of soil health: Methods and applications (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(8): 1541—1546
- [ 27 ] 马克平, 刘灿然, 刘玉明. 生物群落多样性的测度方法 II  $\beta$ 多样性的测度方法. *生物多样性*, 1995, 3(1): 38—43. Ma K P, Liu C R, Liu Y M. Measurement of biotic community diversity II  $\beta$  Measure methods of diversity (In Chinese). *Biodiversity Science*, 1995, 3(1): 38—43
- [ 28 ] Nahar M S, Grewal P S, Miller D, et al. Differential effects of raw and composted manure on nematode community, and its indicative value for soil microbial, physical and chemical properties. *Applied Soil Ecology*, 2006, 34: 140—151
- [ 29 ] Chen X Y, Liu M Q, Hu F. Contributions of soil micro-fauna (protozoa and nematodes) to rhizosphere ecological functions. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(8): 3132—3143
- [ 30 ] 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. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41(5): 883—890
- [ 31 ] 吴建波, 阮维斌, 谢凤行, 等. 毛乌素沙地三种植物根际土壤线虫群落和多样性分析. *生物多样性*, 2008, 16(6): 547—554. Wu J B, Ruan W B, Xie F X, et al. Diversity and community analysis of soil nematodes associated with three plant species in Mu Us sandy land of Ordos Plateau (In Chinese). *Biodiversity Science*, 2008, 16(6): 547—554
- [ 32 ] Wu J H, Fu C Z, Chen S S, et al. Soil faunal response to land use: effect of estuarine tideland reclamation on nematode communities. *Applied Soil Ecology*, 2002, 21: 131—147
- [ 33 ] De Goede R G M, Bongers T, Ettema C H. Graphical presentation and interpretation of nematode community structure: c-p triangles. *Medical Faculty Landbouww University of Gent*, 1993, 58: 743—750
- [ 34 ] 胡诚, 曹志平, 齐迎春, 等. 土壤线虫群落对施用 EM 生物



- 有机肥的响应. 生态学报, 2010, 30(18): 5012—5021. Hu C, Cao Z P, Qi Y C, et al. Response of soil nematode community to multi-year application of EM (effective microorganism) biological-organic manure (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(18): 5012—5021
- [35] Hu C, Qi Y C. Effect of compost and chemical fertilizer on soil nematode community in a Chinese maize field. European Journal of Soil Biology, 2010, 46: 230—236
- [36] McSorley R, Frederick J J. Nematode population fluctuations during decomposition of specific organic amendments. Journal of Nematology, 1999, 31: 37—44
- [37] DuPont S T, Ferris H, Horn M V. Effects of cover crop quality and quantity on nematode-based soil food webs and nutrient cycling. Applied Soil Ecology, 2009, 41: 157—16
- [38] Zhang X K, Jiang Y, Liang L, et al. Response of soil nematode communities to long-term application of inorganic fertilizers in the black soil of Northeast China. Frontiers of Biology in China, 2009, 4(1): 111—116
- [39] 王雪峰, 苏永中, 杨晓, 等. 干旱区沙地长期培肥对土壤线虫群落特征的影响. 中国沙漠, 2011, 31(6): 1416—1422. Wang X F, Su Y Z, Yang X, et al. Responses of soil nematode communities to long-term fertilization in an arid region of China (In Chinese). Journal of Desert Research, 2011, 31(6): 1416—1422

## RESPONSE OF SOIL NEMATODE COMMUNITY TO APPLICATION OF ORGANIC MANURE AND INCORPORATION OF STRAW IN WHEAT FIELD

Ye Chenglong<sup>1</sup> Liu Ting<sup>1</sup> Zhang Yunlong<sup>2</sup> Zhang Junling<sup>2</sup> Shen Qirong<sup>1</sup> Li Huixin<sup>1†</sup>

(1 College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing × 210095, China)

(2 College of Resources and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100194, China)

**Abstract** A field experiment, designed to have six treatments, i. e. CK (no fertilizer and/or manure applied); HF (chemical fertilizer); ZH (composted pig manure and chemical fertilizer); JHB (straw, chemical fertilizer and straw mate); ZHJ (composted pig manure, chemical fertilizer and straw); ZDH (composted pig manure based organic-inorganic complex fertilizer and fertilizer) was conducted to explore effects of application of composted pig manure and straw on population, genera and structure of the soil nematode community in the field. Results show that a total of 22 genera of nematodes of 11 families under 4 orders were found and identified in the six treatments, including 9 genera of bacterivores, 5 genera of fungivores, 4 genera of plant-parasites, 4 genera of omnivores-predators. The total number of nematodes was significantly higher in JHB, ZHJ and ZDH than in CK and HF, while no significant difference between HF and CK. Treatment ZHJ increased the abundance of bacterivores, but inhibited reproduction of phytophagous *Tylenchus* and *Helicotylenchus*. All the five treatments, except ZDH, were significantly lower than CK in abundance of plant-parasites. JHB, ZHJ and ZDH were significantly higher than CK in Nematode Channel Ratio (NCR), indicating that in the fields under organic farming, decomposition of the soil detritus food web relies mainly on bacteria. CK, JHB, ZHJ and ZDH was significantly higher than HF in Mature index (MI), indicating that the application of chemical fertilizer only brings about greater disturbance to the soil environment. No significant difference was found between the six treatments in Shannon-Wiener index ( $H'$ ), Dominance index ( $\lambda$ ), Evenness index ( $J$ ) and Wasilewska index (WI). In all the five fertilized treatments, the c-p 2 group of soil nematodes was the highest in proportion, and was followed by the c-p 3-5 group, and the c-p 1 group the lowest. Comprehensive analysis of nematode trophic groups, community structure and ecological index indicates that JHB and ZHJ were the optimal fertilization modes.

**Key words** Organic manure; Straw incorporation; Nematode diversity; Community structure

(责任编辑: 陈德明)