

长期施用有机肥对红壤旱地土壤线虫群落的影响*

江春^{1,2} 黄菁华¹ 李修强¹ 李辉信^{1†} 孙波^{2†}

(1 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

(2 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要 基于红壤旱地(玉米)的长期施肥试验, 研究长期施用有机肥对土壤线虫分布特征及群落结构的影响。田间试验处理包括: CK(对照)、ON1(低量有机肥)、ON2(高量有机肥)和ON2L(高量改良有机肥)。结果表明, 施肥8a后, 红壤旱地中共鉴定出15科、29属土壤线虫, 包括8属植物寄生线虫、9属食细菌线虫、3属食真菌性线虫和9属捕食杂食性线虫, 短体属(*Pratylenchus*)、小杆属(*Rhabditis*)和原杆属(*Protorhabditis*)为优势属。不同施肥处理中, 土壤线虫总数的大小顺序为ON2 > ON1 > ON2L > CK。线虫群落生态指数对于施用有机肥有不同的响应: 除SI外, 其他虫群落生态指数均有显著差异, 通过线虫群落结构的变化很好地反映了土壤的肥力变化状况, 土壤线虫可以作为施有机肥过程中指示土壤健康质量的一个重要的生物学指标。

关键词 红壤旱地; 有机肥; 土壤线虫; 群落结构

中图分类号 S154.38

文献标识码 A

线虫是土壤中最丰富的生物之一, 对土壤有机物的分解、养分循环和土壤肥力的保持等具有重要作用^[1], 被看作是生态系统变化和农业生态系统受到农业管理等干扰的敏感性指示生物^[2]。相比土壤微生物, 土壤线虫在评价干扰条件下农田生态系统的变化方面具有独特的优势^[3]。土壤线虫的种群结构可反映土壤的健康状况, 如有土壤机质含量、土壤扰动程度和污染程度等^[4]。随着人们对土壤线虫多样性及其生态重要性的广泛关注, 线虫日益被用作评价区域生物多样性及其可持续性的指示生物。

长期大量使用化肥会对土壤肥力、生物多样性和地表水等产生消极影响^[5]。施用有机肥不仅能提供作物生长所需的大量和微量元素, 同时还能够增加土壤的生物活性, 改善土壤物理和化学性质, 如孔隙度、团聚体稳定性等^[6]。

我国整个南方红壤地区总面积为217.96万km², 包括15个省区, 人口约占全国的30%^[7]。但是在中国, 现有关于施肥对线虫群落的长期定位实验主要集中在北方^[8-9], 对南方红壤区域研究较少。随着我国畜禽粪便施用量的迅速增加^[10], 明确有机肥对红壤土壤线虫的种群结构的影响, 可以为指导红壤农业生态系统健康管理和合理施肥提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样地概况

本研究在中国科学院红壤生态开放实验站内进行, 该站位于江西省鹰潭市余江县刘家站(28°15′30″N, 116°55′30″E), 属中亚热带湿润季风气候区, 年均气温17.6℃, 年均降水量1795mm, 年均蒸发量1359mm。

*国家重点基础研究发展规划项目(2011CB100506)、国家自然科学基金项目(40871123)和国家科技支撑计划项目(2009BAD6B03)资助

†通讯作者, E-mail: huixinli@njau.edu.cn; bsun@issas.ac.cn

作者简介: 江春(1987—), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生, 主要从事土壤生态学方面的研究。E-mail: jjc1987@126.com

收稿日期: 2011-04-01; 收到修改稿日期: 2011-06-25

试验于 2002 年 4 月开始进行, 实验小区的规格为 2 m 长×2 m 宽, 试验使用的有机肥为附近养殖场的猪粪。试验设置 4 种处理: 空白处理 CK (N 0 kg hm⁻²a⁻¹)、低量有机肥处理 ON1 (N 150 kg hm⁻²a⁻¹)、高量有机肥处理 ON2 (N 600 kg hm⁻²a⁻¹)、高量有机肥+石灰处理 ON2L (N 600 kg hm⁻²a⁻¹+石灰 3000 kg hm⁻², 其中石灰每 3 年施用 1 次), 其中有机肥 pH 为 7.72, 全氮 32.90g kg⁻¹ (干基, 下同), 全磷 20.17g kg⁻¹, 全钾 14.02g kg⁻¹。每年 4 月初至 7 月下旬在小区内种植玉米 (山东登海 1 号), 种植密度为每小区 20 株, 玉米收获后至次年 3 月休闲。供试土壤为第四纪红黏土发育的红壤, 土壤有机质 6.0 g kg⁻¹, 全氮 0.29 g kg⁻¹, 有效磷 0.02 g kg⁻¹, 速效钾 48.45 mg kg⁻¹, pH4.90^[11]。

1.2 研究方法

采样于 2010 年 7 月 29 日进行, 采用五点采样法, 取样深度为 0~20cm。将取好的土样装入自封袋编号, 带回实验室处理后置于 4℃冰箱内。

土壤理化性质均采用常规方法: pH, 水土比 2.5:1, 酸度计测定; 全氮, 开氏法; 有机质, 重铬酸钾加热法; 有效磷, 盐酸氟化铵浸提钼锑抗比色法; 速效钾, 乙酸铵浸提原子吸收法。

土壤线虫采用改良的蔗糖离心漂浮法^[12]提取, 用 TAF (线虫固定液) 固定后进行线虫科属鉴定。线虫总数通过解剖镜直接计数, 然后按测得的土壤水分, 折算成 1g 干土中土壤线虫的数量。随机抽取 100 条线虫在光学显微镜下进行科属鉴定, 不足 100 条的则全部鉴定。根据线虫的取食习性和食道特征可将其划分为 4 个营养类群: 食细菌线虫 (Bacterivores)、食真菌线虫 (Fungivores)、植物寄生线虫 (Plant-parasites) 和捕食/杂食线虫 (Predators/Omnivores)^[13]。线虫的标本鉴定参考文献^[14]。

线虫群落生态指数: (1) Shannon-Weaver 多样性指数 H' : $H' = -\sum p_i \ln p_i$, 其中 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) 优势度指数 λ : $\lambda = \sum p_i^2$; (3): 瓦斯乐斯卡指数 WI , 反映土壤线虫种群结构组成与土壤健康程度, $WI = (B + F) / PP$, 其中 B 为食细菌线虫数量, F 为食真菌线虫数量, PP 为植物寄生线虫数量; (4) 根据自由生活线虫的生活史计算成熟度指数 MI : $MI = \sum v_i f_i$, 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 值为某一科/属(i)在自由生活线虫^[2]; (5) 根据线虫功能团分别计算富集指数 EI : $EI = 100 \times e / (e + b)$; (6) 结构指数 SI : $SI = 100 \times s / (b + s)$, 其中 e 代表食物网中的富集成分, 主要指食细菌线虫中 c-p 值为 1 和食真菌线虫中 c-p 值为 2 的类群, b 代表食物网中的基础成分, 主要指食细菌线虫和食真菌线虫中 c-p 值为 2 的类群, s 代表食物网中的结构成分群, 分别为食细菌线虫、食真菌线虫和杂食性线虫中 c-p 值为 3-5 的类群以及捕食性线虫中 c-p 值为 2-5 的类群^[15]。

1.3 数据统计分析

主要利用线虫数量和相对丰度以及部分线虫群落生态指数来衡量土壤线虫群落结构的变化。丰度以不同营养类群的线虫数量占线虫总数的百分比(%) 来表示。在 SPSS17.0 软件上进行 LSD 检验和方差分析。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质

施肥后各处理的部分土壤理化性质见表 1。根据统计分析, 施用有机肥后的 3 个处理 (ON1、ON2 和 ON2L), 全氮、有机质、有效磷和速效钾均显著高于 CK ($p < 0.05$), 并且 ON2 和 ON2L 均显著高于 ON1, 但是 pH 只在 ON2 与 ON2L 之间有显著差异。

表 1 各施肥处理部分土壤理化性质

Table 1 Selected physicochemical properties of the soils among different in treatment

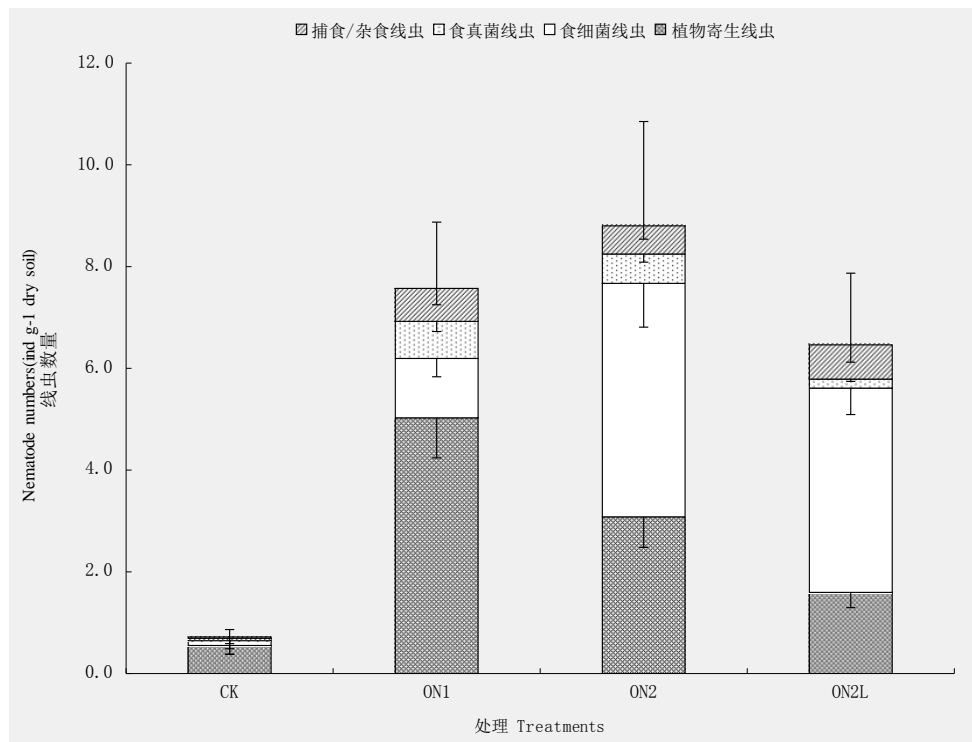
理化性质	CK	ON1	ON2	ON2L
pH (H ₂ O)	5.56±0.28 ab	5.41±0.22 ab	5.26±0.22 b	5.83±0.35 a
全氮 Total N(g kg ⁻¹)	0.48±0.03 c	0.80±0.11 b	1.10±0.01 a	1.08±0.05 a
有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)	4.69±0.74 c	10.80±0.63 b	16.20±0.80 a	15.56±3.11 a
有效磷 Available P (mg kg ⁻¹)	1.37±0.04 c	40.54±8.32 b	206.14±22.84 a	212.11±11.13 a
速效钾 Available K (mg kg ⁻¹)	75.38±11.48 c	82.08±5.47 c	131.81±16.37 b	153.56±10.04 a

注：CK，不施肥料；ON1，施有机肥 150 kg hm⁻²a⁻¹；ON2，施有机肥 600 kg hm⁻²a⁻¹；ON2L，施用改良有机肥 600 kg hm⁻²a⁻¹+3000 kg hm⁻²，石灰每三年施用一次。具有不同英文小写字母表示处理间差异显著 ($p<0.05$)

Note: CK, no organic manure; ON1, low organic manure, N 150 kg hm⁻²a⁻¹; ON2, high organic manure, N 600 kg hm⁻²a⁻¹; ON2L, high organic manure with lime, N 600 kg hm⁻²a⁻¹+3000 kg hm⁻², lime was applied once every 3 years. The different lowercase letters indicate significant difference between treatments at the $p<0.05$ level

2.2 土壤线虫数量

不同施肥处理的红壤旱地土壤线虫的数量如图 1。



注：CK，不施肥料；ON1，施有机肥 150 kg hm⁻²a⁻¹；ON2，施有机肥 600 kg hm⁻²a⁻¹；ON2L，施用改良有机肥 600 kg hm⁻²a⁻¹+3000 kg hm⁻²，石灰每三年施用一次。具有不同英文小写字母表示处理间差异显著 ($p<0.05$)

Note: CK, no organic manure; ON1, low organic manure, N 150 kg hm⁻²a⁻¹; ON2, high organic manure, N 600 kg hm⁻²a⁻¹; ON2L, high organic manure with lime, N 600 kg hm⁻²a⁻¹+3000 kg hm⁻², lime was applied once every 3 years. The different is significantly different at the $p<0.05$ level

图 1 不同处理土壤线虫数量

Fig.1 Numbers of nematode in different treatments

由图 1 可知，4 种不同处理下每克干土土壤线虫的数量范围在 0.7—8.8 条，其中 CK 土壤线虫数量最少(0.7±0.1)，ON2 数量最多 (8.8±1.4)，不同施肥处理中线虫总数为 ON2>ON1>ON2L>CK，

并且 ON1、ON2 和 ON2L 土壤线虫数量显著高于 CK ($p < 0.05$), 施用有机肥处理之间差异不显著。Villenave 等^[16]的研究结果同样表明土壤线虫的密度随有机肥施入量的增加而明显增加。土壤 pH 是土壤中一个非常重要的土壤理化性质, 能够控制许多土壤动物的分布和活性, 并且能够影响土壤动物和微生物之间的关系^[17]。在 4 个处理中, ON2L 施用石灰比 ON2 没有施用石灰的线虫数量要少, 甚至低于 ON1, 可能的原因是施用石灰后增加 pH 使得土壤中蚯蚓的数量和生物量更多, 从而使得蚯蚓捕食线虫数量更多, 使得线虫数量降低^[18]。施用有机肥使得线虫在总数上增加的原因在于植物寄生线虫短体属 (*Pratylenchus*) 以及小杆属 (*Rhabditis*) 和原杆属 (*Protorhabditis*) (表 2) 等食细菌线虫数量的大量增加。可见, 少量优势科/属对土壤线虫群落特征起着至关重要的作用。

2.3 土壤线虫群落

土壤线虫营养类群组成比线虫总数更能反映出土壤腐屑食物网的现状^[19]。本研究对红壤中土壤线虫进行调查, 共鉴定出 15 科 29 属 (表 2), 包括 8 属植物寄生线虫、9 属食细菌线虫、3 属食真菌性线虫和 9 属捕食杂食性线虫。其中短体属 (*Pratylenchus*) 在四个处理中均是优势种, 分别达到 57.9%、59.7%、32.6%、21.8%。而小杆属 (*Rhabditis*) 和原杆属 (*Protorhabditis*) 只在 ON2 和 ON2L 处理中是优势种。轮属 (*Criconrmoides*)、螺旋属 (*Helicotylenchus*)、短体属 (*Pratylenchus*)、丝尾垫刃属 (*Filendus*)、头叶属 (*Cephalobus*)、小杆属 (*Rhabditis*)、原杆属 (*Protorhabditis*)、滑刃属 (*Aphelenchoides*)、真滑刃属 (*Aphelenchus*)、锉齿属 (*Mylonchulus*) 和孔咽属 (*Aporcelaimus*) 均属于共有属。

通过对相对丰富度大于 5% 的线虫进行比较发现, 植物寄生线虫的轮属 (*Criconrmoides*) 和短体属 (*Pratylenchus*) 以及食细菌线虫中的小杆属 (*Rhabditis*) 和原杆属 (*Protorhabditis*) 对施用有机肥反应比较敏感 (表 2)。

表 2 不同处理土壤线虫属的丰度

Table 2 Nematode abundance in different treatments

营养类群 Trophic groups	科 Family	属 Genus	丰度 Abundance(%)			
			CK	ON1	ON2	ON2L
植物寄生线虫 <i>Plant-parasites</i>			76.6	66.4	35.0	24.7
	环科 <i>Criconematidae</i>	环属 <i>Criconema</i>	0	0	0.1	0
		轮属 <i>Criconrmoides</i>	7.5	2.8	0.8	0.5
	纽带科 <i>Hoplolaimidae</i>	螺旋属 <i>Helicotylenchus</i>	3.7	2.2	1.0	2.0
	短体科 <i>Pratylenchidae</i>	短体属 <i>Pratylenchus</i>	57.9*	59.7*	32.6*	21.8*
	垫刃科 <i>Tylenchidae</i>	垫刃属 <i>Tylenchus</i>	0.9	0	0.1	0
		裸矛属 <i>Psilenchus</i>	0.9	0.2	0	0
		丝尾垫刃属 <i>Filendus</i>	4.7	1.1	0.3	0.3
	矮化科 <i>Tylenchorhynchidae</i>	矮化属 <i>Tetylenchus</i>	0.9	0.4	0	0
食细菌线虫 <i>Bacterivores</i>			13.1	15.4	52.2	62.2
	头叶科 <i>Cephalobidae</i>	板唇属 <i>Chiloplacus</i>	0	0.2	0.1	0
		头叶属 <i>Cephalobus</i>	1.9	6.5	4.6	6.6
		真头叶属 <i>Eucephalobus</i>	0	0.9	2.9	0.5
	绕线科 <i>Plectidae</i>	连胃属 <i>Chronogaster</i>	0	1.3	0.7	1.4
		绕线属 <i>Plectus</i>	0.9	0	0	0.3
	盆咽科 <i>Panagrolaimidae</i>	盆咽属 <i>Panagrolaimus</i>	0	0.2	0	0.3
	小杆科 <i>Rhabditidae</i>	小杆属 <i>Rhabditis</i>	2.8	2.4	14.2*	11.1*

		原杆属 <i>Protorhabditis</i>	7.5	3.8	29.3*	41.9*
		中杆属 <i>Mesorhabditis</i>	0	0	0.3	0
食真菌线虫			6.5	9.7	6.6	2.7
<i>Fungivores</i>	滑刃科 <i>Aphelenchoididae</i>	滑刃属 <i>Aphelenchoides</i>	4.7	5.0	2.0	0.5
	真滑刃科 <i>Aphelenchidae</i>	真滑刃属 <i>Aphelenchus</i>	0.9	4.3	4.5	2.2
	垫刃科 <i>Tylenchidae</i>	茎属 <i>Ditylenchus</i>	0.9	0.4	0.1	0
捕食/杂食线虫			3.7	8.5	6.3	10.4
<i>Predators/Omnivores</i>	矛线科 <i>Dorylaimidae</i>	孔咽属 <i>Aporcelaimus</i>	3.6	8.2	3.1	4.8
		中矛线属 <i>Mesodorylaimus</i>	0	0.2	0	0
		拟桑尼属 <i>Thorneella</i>	0	0	0	0.2
		前矛线属 <i>Proderylaimus</i>	0	0	2.0	3.2
		微矛线属 <i>Microdorylaimus</i>	0	0	0.1	0
	单齿科 <i>Mononchida</i>	铯齿属 <i>Mylonchulus</i>	0.1	0.2	0.8	1.9
		单齿属 <i>Mononchus</i>	0	0	0.1	0.2
		锯齿属 <i>Prionchulus</i>	0	0	0	0.2
	三孔科 <i>Enoplida</i>	三孔属 <i>Tripyla</i>	0	0	0.1	0

注：*优势属，个体数占土壤线虫群落个体总数的 10% 以上。CK，不施肥料；ON1，施有机肥 150 kg hm⁻²a⁻¹；ON2，施有机肥 600 kg hm⁻²a⁻¹；ON2L，施用改良有机肥 600 kg hm⁻²a⁻¹+3000 kg hm⁻²，石灰每三年施用一次

Note: *The dominant genera, account for over 10% of soil nematode community. CK, no organic manure; ON1, low organic manure, N 150 kg hm⁻²a⁻¹; ON2, high organic manure, N 600 kg hm⁻²; ON2L, high organic manure with lime, N 600 kg hm⁻²a⁻¹+3000 kg hm⁻², lime was applied once every 3 years

施肥处理对土壤线虫营养类群数量有影响（图 1），施用有机肥对土壤四大营养类群数量均有不同程度的促进作用。从表 1 可以看出，土壤中植物寄生线虫从 CK、ON1、ON2、ON2L 土壤中丰度依次减少，CK 土壤中植物寄生线虫丰度最高，达到了 76.6%，为其他营养种群总和的 3.27 倍；其他施肥处理的土壤中植物寄生线虫丰度分别为 ON1：66.4%；ON2：35.0%；ON2L：24.7%。与此相反，食细菌线虫在土壤中丰度依次增加，ON2L 土壤中最高，达到了 62.2%，为其他营养类群总和的 1.65 倍，其他施肥处理土壤中食细菌线虫种群依次为 CK：13.1%；ON1：15.4%；ON2L：52.2%。

施用有机肥促进植物寄生线虫数量的增加原因可能是施用有机肥有利于提高根系生物量，从而为植物寄生线虫提供更多的取食位点^[20]。但是施用有机肥又会抑制许多植物寄生线虫的发生^[21]，因此有机肥的施用使得植物寄生线虫在数量上增加而又在丰度上下降，这与 Pan 等^[22]的研究有相似之处。植物寄生线虫大多为有害类群，一般认为，植物寄生线虫与植物根系生长情况有关，在植物根系生长较差的情况下，植物寄生线虫易于刺破根系表皮，取食植物体内养分，从而有利于自身的生长繁殖^[23]。

施用有机肥使得食细菌线虫无论是在数量上还是在丰度上均高于 CK，并且除 ON1 外，ON2 和 ON2L 均显著高于 CK ($p < 0.05$)。本试验中食细菌性线虫有变化，其原因是食细菌性线虫以土壤细菌为营养来源，有机肥的施用滋养了丰富的细菌^[24]。Meng 等^[25]研究表明，食细菌线虫与土壤食物网中有机质和营养循环有着密切的关系，因此可以将食细菌线虫作为红壤土壤肥力的一个潜在的生物指标。

食真菌类线虫是指以多种真菌为食的一类线虫，它们主要取食包括在根际生长的真菌、腐生真

菌、病原真菌和菌根真菌等^[26]。本实验中施用有机肥后食真菌线虫均增加，Nahar 等^[27]同样发现采用秸秆和有机肥的混施增加了食真菌线虫的数量，这可能与有机肥增强土壤真菌数量或活性有关。

在线虫四种类群中，捕食/杂食类线虫主要以原生动植物、线虫、线虫卵等为食^[28]，大部分捕食/杂食线虫属于 *k*-策略者，只存在于生态演替高级阶段的生态系统中^[29]。尽管捕食/杂食线虫对于干扰反应比较敏感，但是在本实验中依然发现施有机肥后数量依然显著高于 CK ($p < 0.05$)，这可能是由于有机肥能增加捕食/杂食线虫的食物来源。

2.4 土壤线虫生态指标

表 3 不同处理土壤线虫群落的生态指数

Table 3 Ecological indices of the soil nematode community in different treatments

生态指数 Ecological indices	CK	ON1	ON2	ON2L
多样性指数 (H')	1.40±0.31 b	1.47±0.05 ab	1.77±0.05 ab	1.82±0.09 a
Shannon-Wiener index				
优势度指数 (λ)	0.40±0.10 ab	0.41±0.02 a	0.27±0.04 ab	0.23±0.03 b
Genus dominance index				
瓦斯乐斯卡指数 (WI)	0.37±0.12 b	0.33±0.05 b	1.89±0.70 a	2.60±0.52 a
Wasilewska index				
成熟度指数 (MI)	2.70±0.12 a	2.88±0.05 a	2.19±0.19 b	2.12±0.13 b
Maturity index				
富集指数 (EI)	82.23±11.67 ab	67.75±4.05 b	86.88±5.10 ab	93.85±1.95 a
Enrichment index				
结构指数 (SI)	82.57±8.79 a	75.53±5.63 a	66.48±5.37 a	78.48±8.05 a
Structure index				

注：CK，不施肥料；ON1，施有机肥 150 kg hm⁻²a⁻¹；ON2，施有机肥 600 kg hm⁻²a⁻¹；ON2L，施用改良有机肥 600 kg hm⁻²a⁻¹+3000 kg hm⁻²，石灰每三年施用一次。具有不同英文小写字母表示处理间差异显著 ($p < 0.05$)

Note: CK, no organic manure; ON1, low organic manure, N 150 kg hm⁻²a⁻¹; ON2, high organic manure, N 600 kg hm⁻²; ON2L, high organic manure with lime, N 600 kg hm⁻²a⁻¹+3000 kg hm⁻², lime was applied once every 3 years. The different is significantly different at the $p < 0.05$ level

Shannon-Wiener 多样性指数 (H') 是表明线虫生物多样性程度高低的一个指数，由表 3 可以看出，处理中 ON2L>ON2>ON1>CK，并且 ON2L 与 CK 有显著差异($p < 0.05$)。优势度指数 (λ) 可显示线虫优势种群的存在及其特征，ON2L 中指数最低，说明该处理中土壤线虫群落比较稳定。瓦斯乐斯卡指数 (WI) 反映土壤线虫种群结构组成与土壤健康程度。当 $WI = 1$ 时，表明单位土壤中有利的非植物寄生线虫数量（食细菌和食真菌线虫）与有害的植物寄生线虫数量相当，土壤健康程度一般； $WI > 1$ 时，值越大，说明土壤健康状况越好； $WI < 1$ 时，值越小，说明土壤健康程度越差。ON2 和 ON2L 均显著高于 CK 和 ON1，这说明施用高量有机肥能显著改变土壤的健康程度。成熟度指数反映土壤线虫群落功能结构特征，用以评价人类干扰活动对土壤线虫群落的影响，指数越低，表明环境系统所受的干扰越大^[2]，该指数在 ON2L 中最小 (2.12±0.13)，说明施用高量有机肥加石灰对土壤干扰最大。富集指数 (EI) 主要用于评估食物网对可利用资源的响应，试验中 ON2L 值最大 (93.85±1.95)，与 ON1 存在显著性差异。结构指数 (SI) 可以指示在干扰或恢复过程中土壤食物网结构的变化^[15]，结构指数 (SI) 的变化没有明显差异可能是由于植食者作用时间较短，使得 c-p 值较高的捕食性线虫尚未有足够的响应时间^[30]。

3 结 论

中亚热带红壤旱地施用有机肥 8a 后, 共鉴定出线虫 29 属, 平均每克干土中线虫总数为 5.9 条, 含量和组成比较丰富。本试验中不同有机肥的施用改变了线虫营养类群的数量和丰度。施入有机肥特别是高量有机肥的土壤中, 植物寄生线虫丰度明显下降, 非植物寄生线虫的相对丰度升高。并且线虫生态指数能在一定程度上可以指示施用有机肥对红壤旱地中土壤线虫群落的干扰程度。因此以土壤线虫群落及生物多样性为研究对象将有可能揭示有机肥对红壤生态系统的影响, 从而为农业的可持续发展提供理论指导。

参 考 文 献:

- [1] De G, Ron G M, Bongers T. Nematode community structure in relation to soil and vegetation characteristics. *Applied Soil Ecology*, 1994, 1(1): 29-44
- [2] Bongers T. The maturity index: An ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition. *Oecologia*, 1990, 83(1): 14-19
- [3] Fiscus D A, Neher D A. Distinguishing sensitivity of free-living soil nematode genera to physical and chemical disturbances. *Ecological Applications*, 2002, 12(2): 565-575
- [4] Yeates G W. Nematodes as soil indicators: functional and biodiversity aspects. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, 37(4): 199-210
- [5] Porazinska D L, Duncan L W, Mcsorley R, et al. Nematode communities as indicators of status and processes of a soil ecosystem influenced by agricultural management practices. *Applied Soil Ecology*, 1999, 13(1): 69-86
- [6] Tester C F. Organic amendment effects on physical and chemical properties of a sandy soil. *Soil Science Society of America Journal*, 1990, 54(3): 827-831
- [7] 赵其国, 吴志东, 张桃林, 我国东南红壤丘陵地区农业持续发展和生态环境建设: I. 优势、潜力和问题 (1). 土壤, 1998, 30(3): 113-120. Zhao Q G, Wu Z D, Zhang T L. Sustainable development of agriculture and environment construction in red upland region in southeast China. Advantages, potential and problems (In Chinese). *Soils*, 1998, 30(3): 113-120
- [8] Li Q, Jiang Y, Liang W J, et al., Nematode diversity in phaeozem agroecosystems of northeast China. *Pedosphere*, 2009, 19(5): 597-605
- [9] 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
- [10] 中国科学院南京土壤研究所, 中国农业面源污染控制对策. 北京: 中国环境科学出版社. 2006:9-11, 119, 145-146. Institute of Soil Science, Chinese, Academy of Sciences. Policy for reducing non-pollution from crop production in China (In Chinese). Beijing: Chinese Environmental Science Press, 2006: 9-11, 119, 145-146
- [11] 王秀丽, 孙波. 红壤旱地施用有机肥的氮素淋失过程. 土壤学报, 2008, 45(4): 743-749. Wang X L, Sun B. Nitrogen leaching in upland red soil applied with dairy manure (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(4): 743-749
- [12] 刘满强, 黄菁华, 陈小云, 等. 地上部植食者褐飞虱对不同水稻品种土壤线虫群落的影响. 生物多样性, 2009, 17(5): 431-439. Liu M Q, Huang J H, Chen X Y, et al. Aboveground herbivory by the brown planthopper (*Nilaparvata lugens*) affects soil nematode community under different rice varieties (In Chinese). *Biodiversity Science*, 2009, 17(5): 431-439
- [13] Yeates G W, Bongers T, DeGoede R G M, et al. Feeding-habits in soil nematode families and genera-an outline for soil ecologists. *Journal of Nematology*, 1993, 25(3): 315-331

- [14] 尹文英, 胡圣豪, 沈韞芬, 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.
- [15] Ferris H, Bongers T, de Goede R G M. A framework for soil food web diagnostics: Extension of the nematode faunal analysis concept. *Applied Soil Ecology*, 2001, 18(1): 13-29
- [16] Villenave C, Bongers T, Ekschmitt K, et al. Changes in nematode communities after manuring in millet fields in Senegal. *Nematology*, 2003. 5(3): 351-358
- [17] Killham, K. *Soil ecology*. Cambridge University Press, 1994
- [18] Cole L, Bardgett R D, Ineson P. Enchytraeid worms (Oligochaeta) enhance mineralization of carbon in organic upland soils. *European Journal of Soil Biology*, 2000, 51(2): 185-192.
- [19] Li Q, Jiang Y, Liang W J, et al. Effect of heavy metals on soil nematode communities in the vicinity of a metallurgical factory. *Journal of Environmental Sciences-China*, 2006, 18(2): 323-328
- [20] Wang K H, Mcsorley R, Marshall A, et al. Influence of organic *Crotalaria juncea* hay and ammonium nitrate fertilizers on soil nematode communities. *Applied Soil Ecology*, 2006, 31(3): 186-198
- [21] Clark M S, Ferris H, Klonsky K. Agronomic, economic, and environmental comparison of pest management in conventional and alternative tomato and corn systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1998, 68(1): 51-67
- [22] Pan F J, McLaughlin N B, Yu Q, et al. Responses of soil nematode community structure to different long-term fertilizer strategies in the soybean phase of a soybean-wheat-corn rotation. *European Journal of Soil Biology*, 2010, 46(2): 105-111
- [23] 华建峰, 林先贵, 尹睿, 等. 矿区砷污染对土壤线虫群落结构特征的影响. *生态与农村环境学报*, 2009, 25(1): 79-84. Hua J F, Lin X G, Yin R, et al. Effects of Arsenic contamination on structure of soil nematode community in mining area (In Chinese). *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2009, 25(1): 79-84
- [24] Bulluck L R, Barker K R, Ristaino J B. Influences of organic and synthetic soil fertility amendments on nematode trophic groups and community dynamics under tomatoes. *Applied Soil Ecology*, 2002, 21(3): 233-250
- [25] Meng F X, Ou W, Jiang Y, et al. Vertical distribution and seasonal fluctuation of nematode trophic groups as affected by land use. *Pedosphere*, 2006, 16(2): 169-176
- [26] Freckman D W, Caswell E P. The ecology of nematodes in agroecosystems. *Ann Rev Phytopathol*, 1985, 23:275-296
- [27] 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(2/3): 140-151
- [28] 张薇, 宋玉芳, 孙铁珩, 等. 土壤线虫对环境污染的指示作用. *应用生态学报*, 2004, 15(10): 1973-1978. Zhang W, Song Y F, Sun T Y, et al. Soil nematode as a bioindicator of environment pollution (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(10): 1973-1978
- [39] Bongers T, Bongers M. Functional diversity of nematodes. *Applied Soil Ecology*, 1998, 10(3): 239-251
- [30] Bazot S, Mikola J, Nguyen C, et al. Defoliation-induced changes in carbon allocation and root soluble carbon concentration in field-grown *Lolium perenne* plants: Do they affect carbon availability, microbes and animal trophic groups in soil? *Functional Ecology*, 2005, 19(5): 886-896

RESPONSES OF SOIL NEMATODE COMMUNITY TO LONG-TERM APPLICATION OF ORGANIC MANURE IN UPLAND RED SOIL

Jiang Chun^{1,2} Huang Jinghua¹ Li Xiuqiang¹ Li Huixin^{1†} Sun Bo^{2†}

(1 *College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China*)

(2 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*)

Abstract Based on the long-term experiment carried out in an upland field of red soil, the impacts of long-term application of organic manure on distribution and community structure of soil nematodes were studied. The long-term organic manure application experiment was designed to have four treatments: CK (no pig manure); ON1 (low amount of pig manure); ON2 (high amount of pig manure); ON2L (high amount of pig manure with lime). A total of 15 families and 29 genera of soil nematodes were identified in the upland field, including 8 genera of plant-parasites, 9 genera of bacterivores, 3 genera of fungivores and 9 genera of predators/omnivores, of which *Pratylenchus*, *Rhabditis* and *Protorhabditis* were found to be the dominant genera. The four treatments followed a decreasing order of ON2 > ON1 > ON2L > CK in total nematode number. The soil nematode community responded differently to the treatments in all the ecological indices except for *SI*, which suggests that changes in soil nematode community structure may be used as an indicator of variation of soil fertility and considered an important bioindicator of soil health quality.

Key words Upland red soil; Organic manure; Soil nematode; Community structure