

# 春大豆长期连作对土壤线虫群落结构和食物网的影响

潘凤娟, 韩晓增, 邹文秀

(中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 黑龙江 哈尔滨 150081)

**摘要:**以土壤线虫为指示生物,研究了大豆不同耕作系统土壤线虫群落结构、生态指数和食物网指数的变化特征,以期明确大豆长期连作对土壤生物多样性和土壤食物网结构的影响。结果表明:大豆轮作土壤线虫属最丰富,大豆长期连作25年后土壤线虫属水平种类最少。大豆轮作和大豆短期连作3年土壤线虫群落组成 Jaccard 相似性最高(0.81),大豆轮作和大豆长期连作25年 Jaccard 相似性最低(0.66)。大豆短期连作3年土壤中植物寄生线虫的数量最高,显著高于大豆轮作和大豆长期连作25年。食真菌线虫在大豆长期连作25年土壤中较丰富,显著高于大豆轮作和大豆短期连作3年。大豆长期连作25年植物寄生线虫成熟度指数(PPI)高于大豆短期连作3年和大豆轮作。土壤线虫的通路指数(CI)在3个处理中均小于50,土壤腐蚀食物网的降解以细菌降解通路为主。大豆短期连作3年处理位于富集指数(EI)和结构指数(SI)食物网特征图的A象限,大豆轮作和长期连作25年位于食物网特征图的B象限。结果表明,大豆长期连作改变了土壤线虫的群落结构,降低了属的多样性,食物网结构向成熟稳定的方向恢复。

**关键词:**土壤线虫;大豆;长期连作;群落结构;土壤食物网

**中图分类号:**S565. 1      **文献标识码:**A      **DOI:**10. 11861/j. issn. 1000-9841. 2017. 04. 0606

## Effect of Spring Soybean Long-term Monoculture on Soil Nematode Community Structure and Food web

PAN Feng-juan, HAN Xiao-zeng, ZOU Wen-xiu

(Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, China)

**Abstract:** Soil nematode community structure, ecological index and food web index were investigated under different soybean planting system, aiming to determine the effects of soybean long-term monoculture on soil biological diversity and food web. The results showed that nematode genera were most diverse in wheat/maize/soybean rotation system(SR), flowed by soybean monoculture for 3 years(SS), and were lowest in soybean monoculture for 25 years(SL). Jaccard index was highest between SR and SS, with value of 0.81, and it was lowest between SR and SL, with value of 0.66. The abundant of plant parasites was higher in SS than in SR and SL. Fungivores were most abundant in SL, and were higher than SR and SS. Maturity index of plant parasites was higher in SL than in SS and SR. The value of channel index was lower than 50 in all treatments, indicating bacterial decomposition pathway was dominant in soil food web. Treatment SS was located at the A quadrant of plot of enrichment index vs structure index, and SR and SL were located at B quadrant of the plot. These results indicated that soybean long-term monoculture vary soil nematode community structure and degrade nematode genus diversity, and soybean long-term monoculture drive food web structure towards relative maturity and stability.

**Keywords:** Soil nematode; Soybean; Long-term monoculture; Community structure; Soil food web

土壤线虫是土壤生态系统中重要的组成部分,对环境变化敏感,由于土壤线虫种类繁多,营养类群及功能群多样,在土壤食物网中参与土壤有机物的分解和养分的矿化,对于促进物质循环、能量流动和维持土壤生态系统的稳定具有重要意义<sup>[1-3]</sup>。土壤线虫根据其食性分为植物寄生线虫、食细菌线虫、食真菌线虫以及杂食/捕食线虫。以往对农田植物寄生线虫研究的较多,主要是由于可引起一些严重的植物病害,但近年来随着人们生态保护意识的增强,土壤线虫已被广泛作为土壤指示生物,

评价不同生态系统、土地利用和施肥方式等对土壤生态环境的影响,从而揭示相应的土壤生态过程<sup>[4-7]</sup>。

大豆是我国重要的粮食和油料作物,连作可加重大豆病虫害的发生,尤其大豆胞囊线虫病<sup>[8]</sup>。但近年来研究发现随着大豆连作年限的增加,土壤中胞囊线虫的数量减少,病害减轻,尤其长期种植大豆感病品种后,土壤中大豆胞囊线虫密度低于线虫平均侵染水平<sup>[9]</sup>。大豆连作2年后,大豆胞囊线虫密度显著增加,而连作7年以上,土壤中大豆胞囊线

收稿日期:2017-03-15  
基金项目:国家重点研发计划(2016YFD0200309-6,2016YFD0300806-1);国家自然科学基金(41371296,41571219);国家现代农业产业技术体系建设专项(CARD-04);中国科学院科技服务网络计划(STS计划)(KFJ-SW-STS-142)。  
第一作者简介:潘凤娟(1979-),女,博士,副研究员,主要从事土壤线虫生态和功能研究。E-mail:panfj@iga. ac. cn。  
通讯作者:韩晓增(1957-),男,研究员,博导,主要从事土壤生态环境研究。E-mail:xzhan@iga. ac. cn。

虫种群数量出现下降趋势<sup>[10]</sup>。大豆连作 7~11 年,土壤中大豆胞囊线虫胞囊密度由每 100 g 土壤 139 个降为 52 个,并且大豆长期连作后大豆胞囊线虫的密度与大豆轮作土壤无差异<sup>[11-12]</sup>。这种大豆胞囊线虫出现自然衰退的土壤被称为大豆胞囊线虫抑制性土壤,主要是大豆长期连作后土壤生态环境和微生物种类、群落结构发生了改变<sup>[10-12]</sup>,如在大豆长期连作 23 年土壤中大豆胞囊线虫寄生真菌高于大豆短期连作 2 年和大豆轮作土壤<sup>[13]</sup>。土壤线虫生活在土壤中,与土壤环境密切相关,同时,土壤线虫与微生物具有捕食与被捕食的关系,当微生物群落结构发生变化后对其也会产生一定的影响。大豆长期连作后由于土壤环境和微生物结构的变化产生了大豆胞囊线虫抑制性土壤,在这种抑制性土壤中土壤线虫的群落结构和功能是如何变化的,目前鲜见报道。因此,在大豆长期种植定位区,开展了大豆长期连作对土壤线虫群落结构和土壤食物网影响的研究,以期明确大豆长期连作后对土壤生物多样性和生态环境的影响,为进一步揭示土壤生态过程对作物长期连作的响应提供科学依据。

# 1 材料与方法

## 1.1 试验区概况

研究样地设在中国科学院海伦农业生态实验站,位于黑龙江省海伦市(N47°26',E126°38')。中温带大陆性季风气候,冬季寒冷,夏季高温多雨,年有效积温2 450℃,年均日照时数为2 600~2 800 h,年均无霜期约为 125 d,年平均降雨量 550 mm 左右,主要集中在 7~9 月。该地区是我国典型黑土区,土壤类型为中厚层黑土。

## 1.2 试验设计

试验用地长期定位于 1990 和 1991 年建立的轮作系统,包括大豆、玉米、小麦连作、轮作、迎茬和重茬,每年有各种豆茬出现。小区面积 77 m<sup>2</sup>,本试验选取大豆轮作(麦-米-豆,SR)、大豆短期连作(麦-豆-豆-豆,连作 3 年,SS)和大豆长期连作(连作 25 年,SL)3 个大豆轮作系统。大豆每年 5 月初播种,10 月初收获。品种为东生 9 号。每年施用磷酸二铵 150 kg·hm<sup>-2</sup>,按当地常规管理方式进行田间管理。本研究于 2016 年 7 月取样,取大豆根围 0~20 cm 耕层土壤,随机选取 7 点,均匀混合为 1 次重复,每个处理 3 次重复。

## 1.3 土壤线虫的分离与鉴定

每个土样取 200 g 土壤,采用改良的贝曼浅盘法收集土壤线虫 72 h。将分离到的线虫收集到小玻璃烧杯中饥饿 48 h,60℃ 水浴 10 min 杀死,用三乙

醇胺-福尔马林固定液定容、保存。取 1/4 线虫溶液,在 Olympus 显微镜下将线虫鉴定至属并计数<sup>[14-15]</sup>。根据土壤线虫的食性将其分为 4 个营养类群<sup>[16]</sup>:植物寄生线虫、食细菌线虫、食真菌线虫和杂食/捕食线虫,结合线虫的生活策略(r-对策和 k-对策)划分为不同的功能群。通过测定土壤含水量,最后将土壤线虫换算成 100 g 干土的含量。

## 1.4 数据分析

采用 Jaccard 群落相似性指数<sup>[17]</sup>和优势度指数<sup>[18]</sup>评价大豆轮作方式对土壤线虫群落结构的影响;植物寄生线虫成熟度指数<sup>[19]</sup>和自由生活线虫成熟度指数<sup>[19]</sup>评价线虫属扰动情况;用通路指数(CI)<sup>[20]</sup>、结构指数(SI)<sup>[20]</sup>和富集指数(EI)<sup>[20]</sup>评价大豆轮作方式对土壤线虫食物网的影响。

(1)群落相似性指数(Jaccard): $C_j = j / (a + b - j)$ , $j$ 为所比较的两个群落共有物种的种数, $a$ 和  $b$ 分别为两个群落各自物种数。

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

(3)植物寄生线虫成熟度指数: $PPI = \sum v_i \times f_i$ ,其中  $v_i$ 为根据植物寄生线虫在生态演替中的不同生活策略分别赋予的 c-p 值, $f_i$ 为第  $i$  个属所占的比重。

(4)自由生活线虫成熟指数: $MI = \sum v_i \times f'_i$ ,其中  $v_i$ 为赋予自由生活线虫的相应 c-p 值, $f'_i$ 为某一科/属在自由生活线虫中所占的比重。

(5)通路指数: $CI = 100 \times [0.8Fu_2 / (3.2Ba_1 + 0.8Fu_2)]$ , $Fu$ 和  $Ba$ 分别为食真菌线虫和食细菌线虫,1 和 2 为根据线虫的生活史策略赋予的 c-p 值。

(6)富集指数: $EI = 100 \times [e / (e + b)]$ , $b = \sum k_b \times n_b$ , $b$ 为食物网中的基础成分,主要指  $Ba_2$ 和  $Fu_2$ 这两个类群; $e = \sum k_e \times n_e$ , $e$ 为食物网中的富集成分,主要指  $Ba_1$ 和  $Fu_2$ 这两个类群; $k_b$ 和  $k_e$ 为各类群所对应的加权数; $n_b$ 和  $n_e$ 则为各类群的丰度。

(7)结构指数: $SI = 100 \times [s / (s + b)]$ , $s = \sum k_s \times n_s$ , $s$ 代表食物网中的结构成分,包括  $Ba_3 - Ba_5, Fu_3 - Fu_5, Po_3 - Po_5$ 。 $Ba, Fu$ 和  $Po$ 分别为食细菌、食真菌和杂食性/捕食性线虫; $k_s$ 为各类群所对应的加权数; $n_s$ 为各类群的丰度, $b$ 同富集指数计算,为食物网中的基础成分。

试验数据采用 SPSS 16.0 软件进行 Turkey 分析,在  $P < 0.05$  时进行检验。

# 2 结果与分析

## 2.1 大豆轮作系统对土壤线虫群落组成的影响

本试验共鉴定出 31 属线虫(表 1),植物寄生线

虫 10 属,食细菌线虫 11 属,食真菌线虫 4 属,杂食/捕食线虫 6 属。大豆不同轮作系统土壤线虫在属水平存在差异,在大豆轮作处理中发现 28 属土壤线虫,高于大豆短期连作 3 年的 26 属和大豆长期连作 25 年的 23 属。大豆轮作处理中发现 9 属植物寄生线虫,而大豆短期连作 3 年土壤发现 7 属植物寄生线虫,大豆长期连作 25 年后仅发现了 4 属植物寄生线虫。说明大豆长期连作可降低土壤线虫属水平的种类,主要是降低植物寄生线虫种类。胞囊属线

虫(*Heterodera*)为 3 种大豆轮作系统的共有优势属,大豆长期连作 25 年后,胞囊属、拟丽突属(*Acrobeloides*)和真滑刃属(*Aphelenchus*)为优势属线虫,而未发现在大豆轮作和大豆短期连作 3 年土壤中出现野外垫刃属(*Aglenchus*)、叉针属(*Boleodorus*)、垫刃属(*Tylenchus*)和似绕线属(*Anaplectus*)线虫。可能是由于大豆长期连作后土壤生态环境不利于这 4 类线虫的生存和繁殖,而使其消失或数量降低至难以发现水平。

表 1 大豆不同轮作系统土壤线虫相对丰度

Table 1 Relative abundance of soil nematodes under different soybean rotation systems

营养类群 Trophic group	线虫属 Genus	功能群 Functional group	大豆轮作 Wheat-maize-soybean rotation	大豆短期连作 Short-term soybean continuous cropping	大豆长期连作 Long-term soybean continuous cropping
植物寄生线虫 Plant parasites	小环属 <i>Criconemella</i>	Pp <sub>3</sub>	0.42	—	—
	胞囊属 <i>Heterodera</i>	Pp <sub>3</sub>	30.67	39.82	14.76
	螺旋属 <i>Helicotylenchus</i>	Pp <sub>3</sub>	—	—	1.11
	拟盘旋属 <i>Pararotylenchus</i>	Pp <sub>3</sub>	0.42	0.61	1.11
	盘旋属 <i>Rotylenchus</i>	Pp <sub>3</sub>	1.26	0.61	—
	针属 <i>Paratylenchus</i>	Pp <sub>3</sub>	2.10	5.17	1.48
	拟毛刺属 <i>Paratrichodorus</i>	Pp <sub>4</sub>	0.84	—	—
	野外垫刃属 <i>Aglenchus</i>	Pp <sub>2</sub>	2.10	1.21	—
	叉针属 <i>Boleodorus</i>	Pp <sub>2</sub>	0.42	0.30	—
	垫刃属 <i>Tylenchus</i>	Pp <sub>2</sub>	0.42	0.61	—
	螺旋盘旋拟盘旋幼虫		2.10	5.47	1.85
	无咽属 <i>Alaimus</i>	Ba <sub>4</sub>	1.68	0.91	1.48
食细菌线虫 Bacterivores	拟丽突属 <i>Acrobeloides</i>	Ba <sub>2</sub>	5.46	7.29	10.33
	头叶属 <i>Cephalobus</i>	Ba <sub>2</sub>	—	0.30	1.85
	鹿角唇属 <i>Cervidellus</i>	Ba <sub>2</sub>	0.84	—	—
	板唇属 <i>Chiloplacus</i>	Ba <sub>2</sub>	1.68	3.65	5.90
	真头叶属 <i>Eucephalobus</i>	Ba <sub>2</sub>	8.82	6.69	9.96
	棱咽属 <i>Prismatolaimus</i>	Ba <sub>3</sub>	0.84	0.30	1.11
	似绕线属 <i>Anaplectus</i>	Ba <sub>2</sub>	7.98	2.74	—
	绕线属 <i>Plectus</i>	Ba <sub>2</sub>	1.26	0.30	4.06
	中杆属 <i>Mesorhabditis</i>	Ba <sub>1</sub>	4.20	6.99	8.49
	原杆属 <i>Protorhabditis</i>	Ba <sub>1</sub>	11.76	5.47	8.86
食真菌线虫 Fungivores	茎属 <i>Ditylenchus</i>	Fu <sub>2</sub>	1.68	1.82	1.85
	滑刃属 <i>Aphelenchoides</i>	Fu <sub>2</sub>	0.84	0.91	1.85
	真滑刃属 <i>Aphelenchus</i>	Fu <sub>2</sub>	2.10	2.13	11.81
	丝尾垫刃属 <i>Filenchus</i>	Fu <sub>2</sub>	2.94	2.43	2.58

续表 1

营养类群 Trophic group	线虫属 Genus	功能群 Functional group	大豆轮作 Wheat-maize-soybean rotation	大豆短期连作 Short-term soybean continuous cropping	大豆长期连作 Long-term soybean continuous cropping
杂食/捕食线虫 Omnivores/predators	孔咽属 <i>Aporcelaimus</i>	Op <sub>5</sub>	1. 68	0. 61	1. 48
	前矛线属 <i>Prodorylaimus</i>	Op <sub>5</sub>	0. 42	0. 30	0. 74
	单齿属 <i>Mononchus</i>	Op <sub>4</sub>	–	0. 91	0. 37
	大矛属 <i>Enchodelus</i>	Op <sub>4</sub>	1. 68	1. 22	0. 37
	短体长针 <i>Longidorella</i>	Op <sub>4</sub>	0. 42	0. 61	2. 21
	小矛线属 <i>Microdorylaimus</i>	Op <sub>4</sub>	0. 84	–	0. 74
	矛线科 <i>Dorylaimidae</i>	Op <sub>4</sub>	2. 10	0. 61	3. 69

Jaccard 相似性分析被用于评价土壤线虫群落组成的差异程度,其值越大,表明两个处理间土壤线虫群落组成的相似性越大。大豆轮作和大豆短期连作 3 年土壤线虫群落组成的相似性较高(表 2),其值为 0. 81,其次是大豆短期连作 3 年和长期连作 25 年处理,其相似性为 0. 76,大豆轮作和大豆长期连作 25 年的相似性最低,其相似性为 0. 66。相似性比较分析也表明,大豆连作可以改变土壤线虫属水平的群落组成,大豆长期连作对土壤线虫群落组成改变的程度较短期连作大。

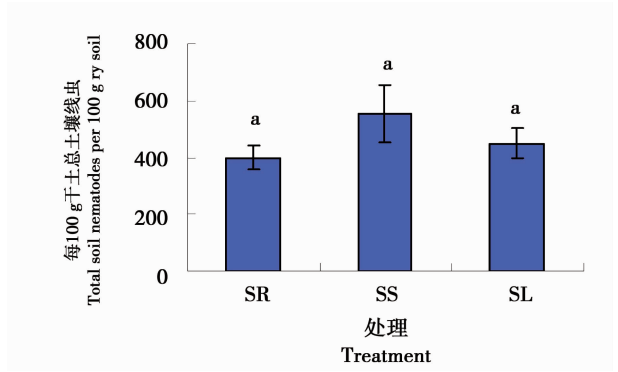
表 2 大豆不同轮作系统土壤线虫群落的 Jaccard 相似性  
Table 2 Jaccard similarity of soil nematodes under different soybean rotation systems

	大豆轮作 Wheat-maize-soybean rotation	大豆短期连作 Short-term soybean continuous cropping	大豆长期连作 Long-term soybean continuous cropping
大豆轮作 Wheat-maize-soybean rotation	1. 00		
大豆短期连作 Short-term soybean continuous cropping	0. 81	1. 00	
大豆长期连作 Long-term soybean continuous cropping	0. 66	0. 76	1. 00

2. 2 大豆不同轮作系统对土壤线虫数量的影响

试验中发现每 100 g 干土线虫数量为 399 ~ 552 条(图 1)。大豆短期连作 3 年土壤中植物寄生线虫的数量最高,为每 100 g 干土 297 条,显著高于大豆轮作(100 g 干土中 162 条线虫)和大豆长期连作(100 g 干土中 91 条线虫)(图 2a)。大豆长期连作 25 年后土壤中的食真菌线虫较丰富,为每 100 g 干土中 81 条,显著高于大豆轮作(100 g 干土中 30 条线虫)和大豆短期连作 3 年(100 g 干土中 41 条线虫)(图 2b)。大豆长期连作 25 年后土壤中的食细菌线虫和杂食/捕食线虫数量略高于大豆轮作和大豆短期连作 3 年土壤(图 2c 和 d)。胞囊线虫数量在 3 种大豆轮作系统中占植物寄生线虫 72% 以上(图 3a),其在大豆短期连作 3 年土壤中数量最高,在大豆长期连作 25 年土壤中数量最低(图 3b)。大豆轮作土壤中植物寄生线虫所占比例为 41%,大豆短期连作 3 年后为 54%,长期连作 25 年为 20%,而

大豆长期连作 25 年后食细菌线虫、食真菌线虫及杂食/捕食线虫所占比例高于大豆轮作和大豆短期连作 3 年土壤(图 4)。



字母相同表示在  $P < 0. 05$  水平差异不显著。下同。  
The same lowercase indicate non-significant difference at the level of  $P < 0. 05$ . The same below.

图 1 大豆不同轮作系统总土壤线虫数量  
Fig. 1 Abundance of total soil nematodes under different soybean rotation systems

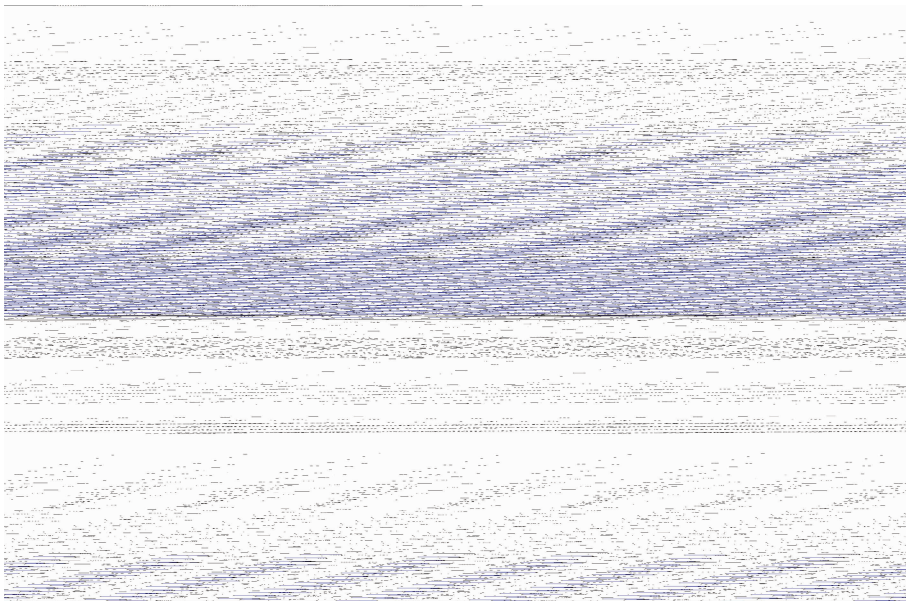


图 2 大豆不同轮作系统下土壤线虫各营养类群丰富度

Fig. 2 Nematode abundance of each trophic group under different soybean rotation systems

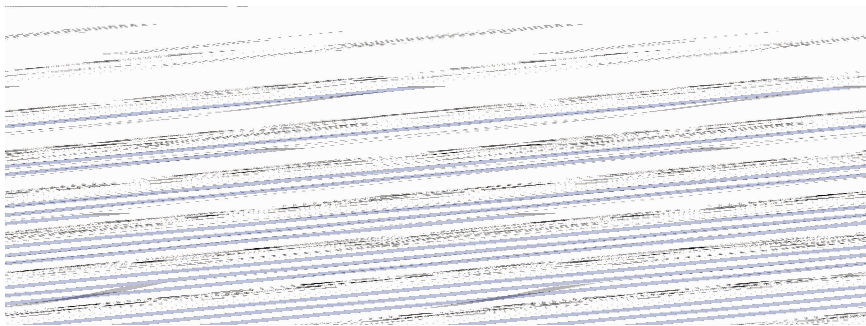


图 3 大豆不同轮作系统下大豆胞囊线虫

Fig. 3 Abundance of SCN under different soybean rotation systems

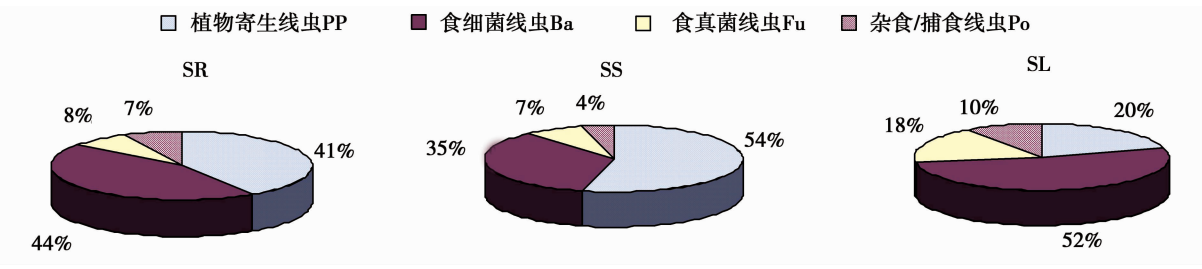


图 4 大豆不同轮作系统下土壤线虫各营养类群相对丰度

Fig. 4 Relative abundance of each nematode trophic group under different soybean rotation systems

2.3 大豆轮作系统对土壤线虫生态指数的影响

大豆不同轮作系统对土壤线虫的优势度指数 ( $\lambda$ ) 具有显著影响 (表 3),  $\lambda$  在大豆短期连作 3 年土壤中最高, 在大豆长期连作 25 年土壤中最低, 其值分别为 0.14 和 0.09, 表明大豆长期连作后土壤线虫属的分布较大豆短期连作更均匀, 群落结构更稳定。大豆长期连作 25 年植物寄生线虫成熟度指数

(PPI) 高于大豆轮作和大豆短期连作 3 年, 表明大豆长期连作后植物寄生线虫由  $r$ -对策向  $k$ -对策演替。自由生活线虫成熟度指数 (MI) 在大豆长期连作 25 年土壤中最高, 其次是大豆轮作, 大豆短期连作 3 年土壤中最低, 但在 3 种大豆轮作系统间差异不显著, 表明大豆轮作和连作对土壤线虫的干扰程度无显著性差异。



表 3 大豆不同轮作系统土壤线虫生态指数

Table 3 Ecological index of soil nematodes under different soybean rotation systems

生态指数	大豆轮作	大豆短期连作	大豆长期连作	<i>F</i>	<i>P</i>
Ecological index	Wheat-maize-soybean rotation	Short-term soybean continuous cropping	Long-term soybean continuous cropping		
λ	0.14	0.19	0.09	8.13	< 0.05
PPI	2.94	2.96	3.00	5.46	< 0.05
MI	2.08	1.97	2.11	1.50	ns

大豆长期连作 25 年后土壤线虫的通路指数 (CI) 呈增加的趋势, 但与大豆轮作和大豆短期连作 3 年处理差异不显著, 其值均小于 50 (图 5)。大豆不同轮作系统土壤线虫的食物网状态存在差异, 大豆短期连作 3 年土壤中富集指数 (EI) 较高, 而结构指数 (SI) 较低, 位于食物网特征图的 A 象限 (图 6), 大豆轮作和大豆长期连作 25 年土壤中的 EI 和 SI 均较高, 位于食物网特征图的 B 象限, 结果表明, 与大豆短期连作相比, 大豆轮作和大豆长期连作土壤食物网受扰动相对较小。

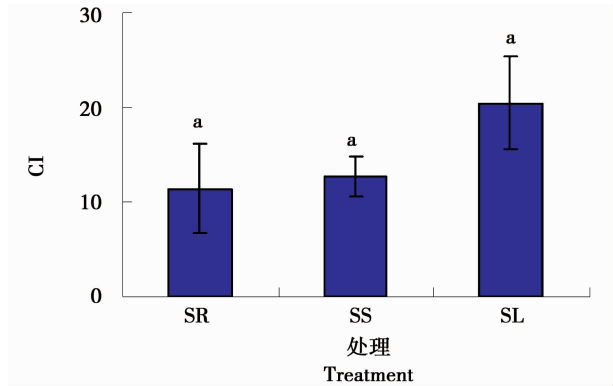
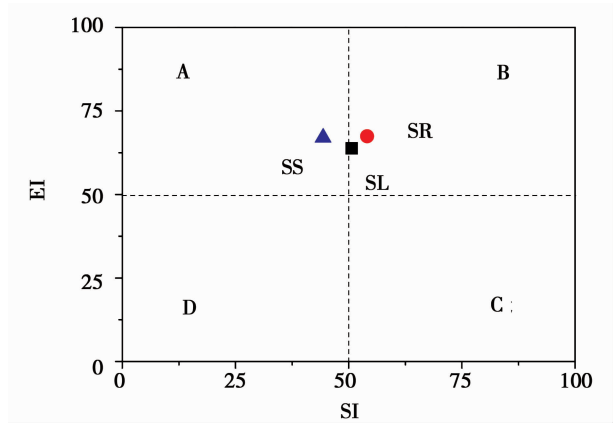


图 5 大豆不同轮作系统降解通路指数

Fig. 5 Channel index in different soybean rotation systems



EI: 丰富度指数; SI: 结构指数; A、B、C 和 D 分别为线虫食物网 4 个象限。

EI: Enrichment index; SI: Structure index; A, B, C and D represent four quadrants of soil food webs.

图 6 大豆不同轮作系统土壤线虫富集指数和结构指数

Fig. 6 Plot of enrichment vs structure indices under different soybean rotation system

3 讨论

本试验共发现 31 属土壤线虫, 线虫数量为每 100 g 干土 399 ~ 552 条, 与以往的研究相比, 发现的线虫属的丰富度和线虫的数量偏少<sup>[21-22]</sup>, 这可能是由于整个夏季雨量偏多的原因。夏季是作物生长旺盛时期, 但也是降雨集中的时期, 取样时间较难掌控。当降雨较多、土壤含水量较大时对土壤线虫会产生严重的负面影响<sup>[23-24]</sup>。虽然取样前近半个月降雨较少, 土壤状况较好, 但之前的降雨可能使土壤线虫的丰富度和数量降到极低的水平, 需要较长的时间才能得以恢复。大豆长期连作后土壤线虫属的丰富度减少, 主要是植物寄生线虫的种类减少。王进闯等<sup>[25]</sup>用分子生物学的方法研究也发现, 随着大豆连作年限的增加, 土壤线虫的物种有降低的趋势。大豆长期连作后土壤环境的改变、物种的相互竞争及微生物的作用, 可能都不利于土壤线虫的生存<sup>[9, 12-13]</sup>。Jaccard 相似性分析发现大豆轮作和大豆短期连作 3 年土壤线虫群落组成的相似性较高, 大豆轮作和大豆长期连作 25 年土壤线虫群落结构组成的相似性最低, 表明大豆连作可以改变土壤线虫属水平的群落组成, 大豆长期连作后改变程度较大。

大豆短期连作 3 年后土壤中胞囊线虫的数量最高, 但大豆长期连作 25 年后其值略低于大豆轮作处理。结合以往的研究, 推测在大豆长期连作的过程中大豆胞囊线虫的种群动态分为不同的阶段或时期, 在大豆连作 1 ~ 3 年为缓慢增加期, 3 ~ 6 年为快速增加期, 6 ~ 8 年为平稳期或缓慢降低期, 8 ~ 13 年为急剧降低期, 大豆连作 13 年后再次为缓慢降低期<sup>[9-12, 21-22]</sup>。大豆长期连作后土壤中植物寄生线虫数量降低, 与胞囊线虫的变化趋势一致。植物寄生线虫及胞囊线虫数量减少应与大豆长期连作后土壤中根系分泌物、土壤理化性质及土壤微生物群落结构变化有关。抗线 3 号大豆品种在大豆轮作土壤中根系分泌物可刺激大豆胞囊线虫卵的孵化, 但在大豆连作 12 年土壤中种植后其根系分泌物抑制了大豆胞囊线虫卵孵化, 可能是大豆连作后土壤中某

些酸、醇、烷和醛类物质的含量增加的原因<sup>[11,26]</sup>。大豆长期连作改变了土壤理化性质,尤其土壤 pH,而在过酸或过碱的条件下都不利于大豆胞囊线虫的繁殖<sup>[27]</sup>。大豆长期连作对大豆胞囊线虫及整个植物寄生线虫的抑制作用也有可能是由于土壤微生物群落结构发生了改变。大豆连作 20 年后土壤中根腐病原菌的密度降低,生防真菌的密度升高<sup>[13,28]</sup>。赵晓晖<sup>[29]</sup>在本试验的大豆长期连作土壤中分离到了大豆胞囊线虫 3 个属生防菌,镰孢菌属 (*Fusarium spp.*)、淡紫拟青霉 (*Paecilomyces lilacinus*) 和厚垣轮枝菌 (*Verticillium chlamydosporia*)。大豆长期连作后土壤中的食真菌线虫高于大豆轮作和大豆短期连作,尤其真滑刃线虫 (*Aphelenchus*) 成为优势属应该与大豆连作后土壤真菌群落结构变化有关。食真菌线虫取食真菌,可影响真菌的生长和代谢活性,但反之也受真菌群落结构和丰富度的影响<sup>[30-32]</sup>。大豆长期连作土壤中微生物群落结构的变化与土壤线虫是否有密切的关系,尤其与有益生防菌和有害病原菌之间的关系,还需要进一步研究。

线虫的生态指数可以从不同的角度评价土壤线虫群落结构和食物网结构特征。大豆短期连作 3 年土壤线虫的优势度指数最高,而大豆长期连作 25 年土壤中优势度指数最低,表明大豆长期连作后土壤线虫属的分布更均匀,群落结构更稳定。这可能是由于长期连作后土壤的生态环境趋于稳定的原因。大豆长期连作 25 年后植物寄生线虫成熟度指数(PPI) 高于大豆短期连作 3 年和大豆轮作土壤。PPI 主要与植物线虫的 c-p 值有关,本研究结果表明大豆长期连作后植物寄生线虫由 r - 对策向 k - 对策演替,从植物寄生线虫的角度分析,生态系统是向更稳定的方向发展<sup>[19]</sup>。土壤线虫的群落结构和食物资源的变化、有机物的分解途径及能量流动等生态过程密切相关<sup>[33]</sup>。线虫的通路指数(CI) 指示土壤腐蚀食物网的降解途径特征<sup>[20]</sup>。CI 值在 3 个大豆轮作系统差异不显著,其值均小于 50,表明大豆长期连作对土壤腐蚀食物网的降解途径无显著影响,均以细菌分解途径为主。土壤线虫富集指数(EI) 和结构指数(SI) 分别指示土壤食物网可利用资源的丰富度和食物网结构的复杂性<sup>[20]</sup>。大豆短期连作 3 年处理位于食物网特征图的 A 象限,表明土壤食物网中可利用的物质较丰富,但土壤食物网处于扰动的状态。大豆轮作和大豆长期连作 25 年处理位于土壤食物网特征图的 B 象限,表明这两个处理土壤食物网趋于成熟状态,受干扰相对较小。

4 结 论

通过对大豆轮作、大豆短期连作 3 年和长期连作 25 年土壤线虫的群落结构和食物网结构进行研究,初步明确大豆长期连作改变了土壤线虫的群落结构,随连作年限的增加,属多样性降低,群落组成相似性也降低。大豆长期连作改变了土壤线虫营养类群结构,降低了植物寄生线虫的丰富度,而增加了食真菌线虫的丰富度,植物寄生线虫由 r 选择向 k 选择演替。大豆长期连作对土壤无显著扰动,食物网结构向成熟稳定的方向恢复。

参考文献

[1] Neher D A. Role of nematodes in soil health and their use as indicators[J]. Journal of Nematology, 2001, 33 (4): 161-168.

[2] 傅声雷. 土壤生物多样性的研究概况与发展趋势[J]. 生物多样性, 2007, 15(2): 109-115. (Fu S L. A review and perspective on soil biodiversity research[J]. Biodiversity Science, 2007, 15(2): 109-115. )

[3] 邵元虎, 傅声雷. 试论土壤线虫多样性在生态系统中的作用[J]. 生物多样性, 2007, 15(2): 116-123. (Shao Y H, Fu S L. The diversity and functions of soil nematodes [J]. Biodiversity Science, 2007, 15(2): 116-123. )

[4] 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. (Li Q, Liang W J, Jiang Y. Present situation and prospect of soil nematode diversity in farmland ecosystems[J]. Biodiversity Science, 2007, 15(2): 134-141. )

[5] 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 & Biochemistry, 2009, 41(5): 883-890.

[6] Pan F, Xu Y, McLaughlin Neil B, et al. Response of soil nematode community structure and diversity to long-term land use in the black soil region in China [J]. Ecological Research, 2012, 27 (4): 701-714.

[7] Djigal D, Chabrier C, Duyck P F, et al. Cover crops alter the soil nematode food web in banana agroecosystems[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2012, 48(4): 142-150.

[8] 许艳丽, 韩晓增, 王光华. 大豆重迎茬研究[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1995. (Xu Y, Han X, Wang G. Research on Soybean continuous cropping[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 1995. )

[9] Chen S. Suppression of *Heterodera glycines* in soils from fields with long-term soybean monoculture [J]. Biocontrol Science and Technology, 2007, 17(2): 125-134.

[10] 靳学慧, 辛惠普, 郑雯, 等. 长期轮作和连作对土壤中大豆胞囊线虫数量的影响[J]. 中国油料作物学报, 2006, 28(2): 189-193. (Jin X H, Xin H P, Zheng W, et al. The influence of soil on the long-term rotation and continuous cultivation on soybean cyst nematode[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2006, 28(2): 189-193. )

- [11] 许艳丽. 土壤环境对大豆胞囊线虫卵孵化影响及线虫分子诊断研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2004. (Xu Y L. The effects of soil environment on soybean cyst nematode (*Heterodera glycines*) egg hatch and nematode molecular diagnosis[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2004. )
- [12] 孙玉秋. 大豆胞囊线虫衰退土抑制特性研究[D]. 北京: 中国科学院, 2011. (Sun Y Q. Characteristics of suppressive soil for soybean cyst nematode [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2011. )
- [13] 宋洁. 连作土壤寄生真菌多样性及对大豆胞囊线虫抑制作用[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016. (Song J. Diversity and suppressive effect of parasitic fungi on soybean cyst nematode in soybean monoculture soil [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016. )
- [14] 尹文英, 胡胜豪, 沈韞芬, 等. 中国土壤动物检索图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 1998. (Yin W Y, Hu S H, Shen W F, et al. Pictorial keys to soil animals of China [M]. Beijing: Science Press, 1998. )
- [15] 张晓珂, 梁文举, 李琪, 等. 长白山森林土壤线虫—形态分类与分布格局[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013. (Zhang X, Liang W J, Li Q, et al. Forest soil nematodes in Changbai Mountain—morphology and distribution [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2013. )
- [16] Yeates G W, Bongers T, de Goede R G M, et al. Feeding-habits in soil nematode families and genera—an outline for soil ecologists [J]. *Journal of Nematology*, 1993, 25(3): 315-331.
- [17] 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 [J]. *生物多样性*, 1995, 3(1): 38-43. (Ma K P, Liu C R, Liu Y M. Measurement methods of biodiversity II  $\beta$  method [J]. *Chinese Biodiversity*, 1995, 3(1): 38-43. )
- [18] Simpson E H. Measurement of diversity [J]. *Nature*, 1949, 163: 688.
- [19] Bongers T. The maturity index: An ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition [J]. *Oecologia*, 1990, 83 (1): 14-19.
- [20] Ferris H, Bongers T, de Goede R G M. A framework for soil food web diagnostics: Extension of the nematode faunal analysis concept [J]. *Applied Soil Ecology*, 2001, 18 (1): 13-29.
- [21] 韩新华, 许艳丽, 潘凤娟, 等. 黑土区轮作系统大豆田土壤线虫种群结构研究 [J]. *大豆科学*, 2008, 27 (1): 118-123. (Han X H, Xu Y L, Pan F J, et al. Community structure of soil nematodes in soybean fields under different rotation systems [J]. *Soybean Science*, 2008, 27 (1): 118-123. )
- [22] 潘凤娟, 许艳丽, 李春杰, 等. 大豆不同轮作体系根围土壤线虫空间分布特征 [J]. *农业系统科学与综合研究*, 2009, 25 (1): 33-38. (Pan F J, Xu Y L, Li C, et al. Spatial distribution of soil nematodes in soybean rhizosphere under different rotation systems [J]. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2009, 25 (1): 33-38. )
- [23] Griffiths B S, Young I M, Caul S. Nematode and protozoan dynamics on decomposing barley leaves incubated at different soil matric potentials [J]. *Pedobiologia*, 1995, 39(5): 454-461.
- [24] 李萌, 何先进, 吴鹏飞. 土壤线虫对短期水分变化的响应 [J]. *西南农业学报*, 2014, 27(2): 710-714. (Li M, He X J, Wu P F. Responses of soil nematodes to short-term soil water content changes [J]. *Responses of Soil Nematodes to Short-term Soil Water Content Changes*, 2014, 27(2): 710-714. )
- [25] 王进闯, 王敬国. 大豆连作土壤线虫群落结构的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(4): 1022-1031. (Wang J C, Wang J G. Effects of continuous soybean monoculture on soil nematode community [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(4): 1022-1031. )
- [26] 李业成, 马凤鸣, 吴蕾, 等. 正茬与连作大豆根系分泌物差异及对大豆幼苗生长的影响 [J]. *东北农业大学学报*, 2010, 41 (6): 1-6. (Li Y C, Ma F M, Wu L, et al. Difference effect of rotation and continuous soybean root secretion on seedling growth of soybean [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2010, 41 (6): 1-6. )
- [27] 武天龙, 杨庆凯, 张玉梅. 土壤不同因子对大豆胞囊线虫繁殖影响的初步研究 [J]. *东北农业大学学报*, 1996, 27(2): 132-136. (Wu T L, Yang Q K, Zhang Y M. Effects of soil environmental factors on reproduction of soybean cyst nematode [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 1996, 27(2): 132-136. )
- [28] 魏巍. 大豆长期连作土壤对根腐病原微生物的抑制作用 [D]. 北京: 中国科学院, 2012. (Wei W. The suppressiveness caused by long-term continuous cropping of soybean on the root rot and pathogen [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2012. )
- [29] 赵晓晖. 大豆胞囊线虫抑制性土壤中寄生真菌及其作用研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011. (Zhao X H. Suppressive soil of soybean cyst nematode and parasitic fungi [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2011. )
- [30] Renker C, Alpehi J, Buscot F. Soil nematodes associated with the mammal pathogenic fungal genus *Malassezia* (Basidiomycota: Ustilaginomycetes) in Central European forests [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, 37(1): 70-72.
- [31] 李辉信, 毛小芳, 胡锋, 等. 食真菌线虫与真菌的相互作用及其对土壤氮素矿化的影响 [J]. *应用生态学报*, 2004, 15 (12): 2304-2308. (Li H X, Mao X F, Hu F, et al. Interactions between fungal-feeding nematodes and fungi and their effects on soil nitrogen mineralization [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(12): 2304-2308. )
- [32] Nieminen J K, Setälä H. Bacteria and microbial-feeders modify the performance of a decomposer fungus [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, 33(12-13): 1703-1712.
- [33] 吴纪华, 宋慈玉, 陈家宽. 食微线虫对植物生长及土壤养分循环的影响 [J]. *生物多样性*, 2007, 15(2): 124-133. (Wu J H, Song C Y, Chen J K. Effect of microbivorous nematodes on plant growth and soil nutrient cycling: A review [J]. *Biodiversity Science*, 2007, 15(2): 124-133. )