

土壤线虫群落对大连石门山森林植被恢复的响应

张伟东*, 尚艳芳, 王雪峰

(辽宁师范大学生命科学学院环境科学系, 大连 116029)

摘要: 2007年9月至2008年8月对大连石门山不同植被恢复方式的样地进行土壤线虫调查, 淘洗-过筛-浅盘法提取土壤线虫, 应用类群属数、个体密度、多样性指数和功能类群指数等多个群落参数, 研究不同植被恢复方式间土壤线虫群落特征的差异。共捕获线虫 8577 条, 分别隶属于线虫动物门 2 纲 7 目 26 科 43 属, 个体密度平均 4.77 条/g 干土。研究结果表明, 土壤线虫数量存在明显的季节波动, 秋季明显高于夏季和春季; 土壤线虫群落多样性指数、均匀度指数、丰富度指数和营养类群指数大小依次为阔叶林、针叶林和混交林, 而优势度指数却表现为: 针叶林 > 混交林 > 阔叶林; 土壤线虫群落营养类群 f/b 值、 MI 指数、 PPI 指数、 MMI 指数、 $MI2-5$ 指数、 SI 指数和 EI 指数均表现为: 阔叶林 > 针叶林 > 混交林, 而 PPI/MI 指数则表现为: 混交林 > 针叶林 > 阔叶林, 表明混交林受干扰明显; 土壤理化特征与线虫数量、属数、生态指数间也存在明显相关关系。因此, 植被恢复过程中土壤线虫群落结构分异及动态是一个重要的生态响应过程, 能为进一步研究土壤生物在植被演替中的地位和作用以及土壤生物多样性保护提供基础数据。

关键词: 植被恢复; 土壤线虫; 群落结构; 生物多样性

The response of soil nematode community to vegetation restoration in Shimenshan in Dalian

ZHANG Weidong*, SHANG Yanfang, WANG Xuefeng

Department of Environmental Science, College of Life Science, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

Abstract: The soil sample of different vegetation restoration practices were surveyed from September in 2007 to August in 2008 in Shimenshan in Dalian. The nematodes were collected from the soil using elutriate-sieving-shallow pan method. The species richness, abundance, diversity index and ecological index were analyzed. A total of 8577 soil nematodes were collected, belonging to 2 classes, 7 orders, 26 families and 43 genera. The individual density was 4.77 inds. per gram dry soil. The results indicated that the number of soil nematode fluctuated significantly with season, the number of soil nematode in autumn is significantly more than that in summer and in spring. Shannon-Wiener index, Pielou index, Margalef index and Trophic diversity index were used in analyzing the diversity of nematode community, ranking $Cc > Pm > Clc$, while Simpson index ranking $Pm > Clc > Cc$. The value of f/b , MI index, PPI index, MMI index, $MI2-5$ index, SI index and EI index were used in analyzing the characteristics of the functional structure of the nematode communities, ranking $Cc > Pm > Clc$, while PPI/MI value ranking $Clc > Pm > Cc$. It showed that the Clc was disturbed significantly. Soil physical and chemical characters were correlated significantly with the number of nematodes, the number of genera and ecological indices. Thus, we conclude that the dynamics of nematodes are an important biological indicator for vegetation restoration.

Key Words: vegetation restoration; soil nematode; community characteristic; biodiversity

土壤线虫是土壤生态系统的重要功能组分^[1-2], 它们通过与植物根系以及土壤中其他生物之间的相互作用影响植物的生长。它们能够改变养分的矿化速率及其在土壤中的空间分布、改变根际微生物的群落结构和

收稿日期: 2008-12-24; 修订日期: 2009-03-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangweidong64@yahoo.com.cn

植物根际的激素状况,从而间接地改变植物之间的竞争平衡,进而影响到植物群落组成。同时,地上植物群落的演替会改变土壤生态系统物质和能量的输入,从而使土壤物理、化学性质发生改变,而土壤动物必然会在结构和功能上做出相应响应。因此,土壤线虫在有机质分解、植物营养矿化及养分循环过程中起重要作用^[2-3]。由于土壤线虫类群和数量丰富,很多物种可以在极端条件下生存^[4],而且世代时间短,对生境变化反应灵敏,对其研究不仅有助于揭示土壤生态系统的结构,还可以提供有关土壤生态过程的独特信息^[5],因此被广泛应用于土壤干扰程度的指示生物^[6-8]。线虫具有监测土壤系统过程及状况的潜力^[5],可以作为不同生态系统土壤过程的指示因子^[9-11]。土壤线虫群落组成及多样性的变化还可以指示土壤生态系统扰动及恢复水平^[12-15]。20 世纪 80 年代以来国外关于不同环境条件及管理措施下土壤线虫群落变化的研究得到重视^[16-20]。我国则从 20 世纪 90 年代开始有相关报道^[14, 21-24]。

近年来,有关生态系统恢复与重建的研究受到广泛关注,但许多学者多致力于植被恢复和土壤理化性质改良两大方面,而与线虫等土壤动物相关的研究涉及不多。土壤动物长期生活在地下,是土壤生态系统中不可分割的组成部分,它们在分解残体、改变土壤理化性质、土壤的形成与发育、土壤物质迁移与能量转化等方面有重要的作用,因此可以利用土壤动物在土壤生态系统中的变化作为生态恢复的指标来研究森林生态系统的恢复与重建。

本文以大连市石门山不同植被类型为实验样地,着重研究土壤线虫群落组成、数量、垂直分布、多样性等方面的响应特征,为探索不同植被恢复过程中土壤生物学过程以及土壤生物多样性保护提供基础资料,为促进土壤生态系统健康发展提供科学依据。

1 样地概况

试验地为石门山位于大连市西部,横跨沙河口区和甘井子二区。属于大陆性气候,年平均降雨量在 650—790mm 之间,主要集中在 4—6 月份和 7—9 月份。整个山体分为南沟、中沟和西沟 3 部分。植被类型主要可分为针阔混交林、阔叶林和针叶林 3 种类型。土壤为粗骨性土壤,土层较浅,土壤较贫瘠,地势不平坦。针阔混交林区土壤为薄层山地棕色森林土,主要植物种类为豆科洋槐、豆科紫穗槐、鼠李科山枣、忍冬科忍冬、茜草科茜草、蔷薇科毛樱桃等,植被覆盖度达 70%,年凋落物量为 0.75kg/m²;阔叶林区土壤为棕壤性土,主要植物种类为辽东栎,地面植被有月间草、大麻等草本植物,植被覆盖度达 90%,年凋落物量为 1kg/m²;针叶林区土壤为棕黄土,主要植物种类以马尾松和侧柏为主,还包括一些少量的辽东栎、皂角等,植被覆盖度达 80%,年凋落物量为 0.5kg/m²。

2 研究方法

2.1 样品采集与处理

于 2007 年 9 月至 2008 年 8 月,按春(3—5 月份)、夏(6—8 月份)、秋(9—11 月份)共 3 次对研究样地进行土壤线虫取样,其中冬季由于严寒,土壤中几乎无土壤动物活动,所以冬季未采样。不同植被(混交林、阔叶林、针叶林)下采用 3 点混合取样法,各样地取样深度 20cm,沿土壤剖面划分为 0—10cm、10—20cm 两层,共取土样 54 份。

每份土样称取 100g 土,采用淘洗-过筛-浅盘法实验室分离提取线虫^[25],线虫标本主要依据尹文英《中国土壤动物检索图鉴》鉴定^[26],一般鉴定到属,并依据土壤湿度,将土壤线虫个体数量折算成每 100g 干土含有线虫的条数^[27]。

2.2 土壤理化指标测定

土壤含水率采用烘干土法测定;土壤有机质采用水合热重铬酸钾-硫酸-比色法;铵态氮采用靛酚兰比色法(不用硝普钠);硝态氮采用硝酸淀粉法;速效钾采用四苯硼钠比浊法;速效磷采用 NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法,不同恢复阶段土壤基本理化性质见表 1。

2.3 数据处理

(1)各类群数量多度的划分 个体数占总捕获量 10% 以上者为优势类群(+ + +),1%—10% 为常见类

群(++) ,1% 以下为稀有类群(+)^[28]。

表 1 不同植被恢复阶段样地特征

Table 1 Soil conditions of different restoration stages of vegetation

恢复阶段 Restoration stage	土壤含水率 Soil moisture /%	有机质 Organic matter /(g/kg)	铵态氮 N-NH ₃ /(mg/kg)	硝态氮 N-NO ₃ /(mg/kg)	速效钾 Available K /(mg/kg)	速效磷 Available P /(mg/kg)
混交林 Mixed forest (C1c)	15.11	40.15	11.13	4.95	131.98	7.83
阔叶林 Broad-leaved forest (Cc)	30.30	42.29	12.91	7.61	186.30	7.23
针叶林 Coniferous forest (Pm)	30.00	35.88	9.99	4.50	105.25	5.17

根据线虫头部形态学特征和取食生境将土壤线虫分为以下 4 个营养类群:食细菌类群(bacterivores)、食真菌类群(fungivores)、植物寄生类群(plant parasites)、捕食类群/杂食类群(predators/Omnivores)。

(2) 多样性指数计算 本文采用 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数、Margalef 丰富度指数、Simpson 优势度指数和线虫营养多样性指数 *TD* 计算各植被恢复阶段土壤线虫群落多样性。公式如下:

Shannon-Wiener 多样性指数(*H'*)
$$H' = - \sum n_i/N \times \ln(n_i/N)$$

式中, n_i 为第 i 个类群的个体数, N 为群落中所有类群的个体总数。

Pielou 均匀度指数(*J*)
$$J = H'/\ln S$$

式中, S 为类群数

Simpson 优势度指数(*C*)
$$C = \sum P_i^2$$

式中, $P_i = n_i/N$ 。

Margalef 丰富度指数(*SR*)
$$SR = (S - 1)/\ln N$$

线虫营养多样性指数(*TD*)
$$TD = 1/\sum p_i^2$$

(3) 功能类群指数计算 本文采用 *WI* (wasilewska index) 指数、*f/b*、自由生活线虫成熟度指数 *MI* (maturity index)、植物寄生线虫成熟度指数 *PPI* (plant parasite index)、总成熟度指数 *MMI*、*MI2-5* 指数、结构指数 *SI* (structure index)、富集指数 *EI* (enrichment index)、基础指数 *BI* (the basal index)、线虫通路指数 *NCR* (nematode Channel Ratio) 表达各生境土壤线虫群落功能结构特征。指数计算公式如下:

WI (Wasilewska index) = $(f + b)/pp$

式中, f 、 b 和 pp 分别为食真菌、食细菌和植物寄生性线虫的数量。

MI 指数(*PPI* 指数、*MMI* 指数)
$$MI (PPI, MMI) = \sum_{i=1}^n cp_i \times p_i$$

式中, cp_i 为非植物寄生性(植物寄生性)土壤线虫第 i 类群 colonizer-persister 值; n 为非植物寄生性(植物寄生性)土壤线虫类群数; P_i 为土壤线虫群落非植物寄生性(植物寄生性)土壤线虫第 i 类群的个体数占群落总个体数的比例。

结构指数:
$$SI = 100 \times s/(s + b)$$

富集指数:
$$EI = 100 \times e/(e + b)$$

基础指数:
$$BI = 100 \times b/(s + e + b)$$

其中, b 代表食物网中的基础成分, 主要指 Ba2 和 Fu2 这两个类群(即食细菌线虫和食真菌线虫中 cp 值为 2 的类群); e 代表食物网中的富集成分, 主要指 Ba1 和 Fu2 这两个类群(即食细菌线虫中 cp 值为 1 和食真菌线虫中 cp 值为 2 的类群); s 代表食物网中的结构成分, 包括 Ba3—Ba5、Fu3—Fu5、OP3—OP5、H2—H5 类群(分别为食细菌线虫、食真菌线虫和杂食线虫中 cp 值为 3—5 的类群以及捕食线虫中 cp 值为 2—5 的类群), b 、 e 和 s 对应的值分别为 $\sum k_b n_b$ 、 $\sum k_e n_e$ 和 $\sum k_s n_s$, 其中 k_b 、 k_e 和 k_s 为各类群所对应的加权数(其值在 0.8—5.0 之间), 而 n_b 、 n_e 和 n_s 则为各类群的相对多度。

线虫通路指数

$$NCR = b / (b + f)$$

其中 b 和 f 分别为食细菌线虫和食真菌线虫占线虫总数的相对多度。这一比值在 1(分解过程完全由细菌控制)和 0(分解过程完全由真菌控制)之间波动。

数据统计处理、方差分析、相关分析均在 Excel、SPSS 软件上进行。

3 结果

3.1 不同植被恢复阶段土壤线虫群落组成及数量分异特征

3.1.1 线虫群落组成

研究期间共捕获线虫 8577 条,分别属于线虫动物门 2 纲 7 目 26 科 43 属(表 2)。其中绕线属(*Plectus*)为优势属,个体数占总捕获个体数量的 10.10%;常见属较多,包括 *Filenchus* 等 22 属,个体数占总捕获个体数量的 82.57%,稀有属数较多,包括滑刃属(*Aphelenchoides*)等 20 属,个体数占总捕获个体数的 7.74%。优势属和常见属个体数量共占总捕获个体数量的 92.67%,这些类群个体数量多,构成了研究区土壤线虫群落的主体。

混交林中捕获土壤线虫 35 属 2970 条。优势属为绕线属、*Filenchus* 和真矛属(*Eudorylaimus*),个体数共占该样地总捕获个体数的 38.72%;常见属有螺旋属(*Helicotylenchus*)等 17 属,共占总捕获个体数的 53.91%;稀有属 *Heterocephalobus* 等 15 属,共占总捕获个体数的 7.37%。

阔叶林中捕获土壤线虫 42 属 2865 条。其中优势属为螺旋属,共占总捕获个体数的 13.37%;常见属有绕线属等 24 属,共占总捕获个体数的 80.03%,稀有属滑刃属等 17 属,共占总捕获个体数的 6.60%。

针叶林中捕获土壤线虫 39 属 2742 条。其中优势属为绕线属,共占总捕获个体数的 13.64%;常见属有 *Filenchus* 等 20 属,共占总捕获个体数的 78.15%;稀有属有滑刃属等 18 属,共占总捕获个体数的 8.21%。

3.1.2 线虫数量分异特征

土壤线虫平均密度是 4.77 条/g 干土,其中 0—10cm 土层的密度是 6.60 条/g 干土,10—20cm 土层是 4.08 条/g 干土。

不同植被恢复阶段土壤线虫数量呈现出较明显的分异规律,0—10cm 土层混交林高于阔叶林和针叶林,10—20cm 土层混交林 > 阔叶林 > 针叶林。

3.2 不同植被恢复阶段土壤线虫群落结构特征

3.2.1 线虫群落垂直分布

线虫类群属数及个体密度在各恢复阶段中随土层深度增加呈现递减趋势,这种现象在春季和秋季尤为明显,而在夏季不明显,这可能与不同季节的温度有关。0—10cm 的线虫数量是 10—20cm 的 1.62 倍。

3.2.2 线虫群落季节动态

线虫个体密度秋季明显高于夏季和春季,其中春和秋、夏和秋之间的差异达到极显著水平($P < 0.01$)。统计结果显示,在 0—10cm 土层,个体密度及属数在春、秋;夏、秋之间的差异都达到极显著水平($P < 0.01$);在 10—20cm 土层,个体密度在春秋($P < 0.05$)、夏秋($P < 0.01$)都达到显著水平,说明表层土壤的线虫密度受季节的影响比底层土壤明显(图 1)。

3.2.3 线虫群落多样性特征

采用多样性 H' 指数、均匀度 J 指数、丰富度 SR 指数、优势度 C 指数和营养多样性 TD 指数计算不同植被下土壤线虫群落多样性。从表 3 数据可以看出,各恢复阶段多样性指数 H' 、均匀度指数 J 、丰富度指数 SR 和营养多样性指数 TD 空间分布均为:阔叶林(Ce) > 针叶林(Pm) > 混交林(Clc),而优势度指数 C 为:针叶林 > 混交林 > 阔叶林。混交林多样性下降可能是由于凋落物层种类不丰富和受到干扰而造成的。

3.2.4 线虫群落功能类群特征

采用 WI 指数、 f/b 、 MI 指数、 PPI 指数、 MMI 指数、 PPI/MI 指数、 $MI2-5$ 指数、 SI 指数、 EI 指数、 BI 指数、 NCR 指数研究不同植被恢复下土壤线虫群落功能结构的差异。功能类群划分和 cp 值的确定见表 2。从表 4

表 2 不同植被线虫群落组成

Table 2 Composition of soil nematode communities in the different vegetation

线虫属 Genera of nematode	混交林 Cle		阔叶林 Ce		针叶林 Pm		合计 Total		功能团 Guild
	个体数 Ind	优势度 Dominance	个体数 Ind	优势度 Dominance	个体数 Ind	优势度 Dominance	个体数 Ind	优势度 Dominance	
绕线属 <i>Plectus</i>	314	+++	178	++	374	+++	866	+++	Ba2
* <i>Filenchus</i>	530	+++	76	++	89	++	695	++	H2
真矛属 <i>Eudorylaimus</i>	306	+++	113	++	145	++	564	++	PO4
螺旋属 <i>Helicotylenchus</i>	137	++	383	+++	210	++	730	++	H3
丽突属 <i>Acrobeles</i>	37	++	51	++	69	++	157	++	Ba2
拟丽突属 <i>Acroboloides</i>	72	++	109	++	191	++	372	++	Ba2
真头叶属 <i>Eucephalobus</i>	98	++	94	++	215	++	407	++	Ba2
威尔斯属 <i>Wilsonema</i>	44	++	33	++	51	++	163	++	Ba2
* <i>Monhystera</i>	43	++	83	++	44	++	170	++	Ba2
真单宫属 <i>Eumonhystera</i>	133	++	223	++	119	++	475	++	Ba2
连胃属 <i>Chronogaster</i>	211	++	225	++	224	++	660	++	Ba2
三孔属 <i>Tripyla</i>	84	++	62	++	108	++	254	++	Ba3
* <i>Paraphelenchus</i>	183	++	121	++	74	++	378	++	Fu2
针属 <i>Paratylenchus</i>	269	++	83	++	83	++	435	++	H2
异皮属 <i>Heterodera</i>	96	++	28	++	55	++	179	++	H3
* <i>Dorydorella</i>	32	++	111	++	53	++	196	++	PO4
* <i>Microdorylaimus</i>	54	++	77	++	93	++	224	++	PO4
滑刃属 <i>Aphelenchoides</i>	31	++	2	+	19	+	52	+	Fu2
* <i>Aporcelaimium</i>	44	++	58	++	24	+	126	++	PO5
* <i>Clarkus</i>	33	++	25	+	6	+	64	+	PO4
* <i>Heterocephalobus</i>	28	+	55	++	105	++	188	++	Ba2
鹿角唇属 <i>Cervidellus</i>	19	+	40	++	16	+	75	+	Ba2
盆咽属 <i>Panagrolaimus</i>	11	+	5	+	41	++	57	+	Ba1
* <i>Trischistoma</i>	16	+	31	++	14	+	61	+	Ba3
* <i>Teratocephalus</i>	1	+	36	++	54	++	91	++	Ba3
* <i>Pseudhalenchus</i>	13	+	142	++	120	++	275	++	Fu2
* <i>Coslenchus</i>	23	+	195	++	13	+	231	++	H2
* <i>Epidorylaimus</i>	22	+	69	++	21	+	112	++	PO4
小杆属 <i>Rhabditis</i>	13	+	18	+	9	+	40	+	Ba1
无咽属 <i>Alaimus</i>	14	+	19	+	17	+	50	+	Ba4
半轮属 <i>Hemichonemoides</i>	13	+	14	+	4	+	31	+	H3
* <i>Aporcelaimellus</i>	6	+	7	+	20	+	33	+	PO5
* <i>Paraxonchium</i>	9	+	22	+	6	+	37	+	PO5
膜皮属 <i>Diphtherophora</i>	24	+	22	+	15	+	61	+	PO3
* <i>Bursaphelenchus</i>	7	+					7	+	Fu2
瓣唇属 <i>Panagrobelus</i>			18	+	4	+	22	+	Ba1
棱咽属 <i>Prismatolaimus</i>			2	+	3	+	5	+	Ba3
中杆属 <i>Mesorhabditis</i>			7	+	21	+	28	+	Ba1
垫咽属 <i>Tylencholaimus</i>			2	+	3	+	5	+	PO4
前矛线属 <i>Prodorylaimus</i>			15	+	10	+	25	+	PO5
异色矛属 <i>Achromadora</i>			4	+		4	+	Ba3	
* <i>Seinura</i>			5	+		5	+	Fu2	
盘咽属 <i>Discolaimus</i>			2	+		2	+	PO5	
合计 Total	2970		2865		2742		8577		

(1) Ba 食细菌类群; Fu 食真菌类群; PO 捕食类群/杂食类群; H 植物寄生类群; (2) Ba、Fu、PO、H 后面的数字代表每个线虫属的 *cp* 值;

(3) * 代表至今未查到其中文名

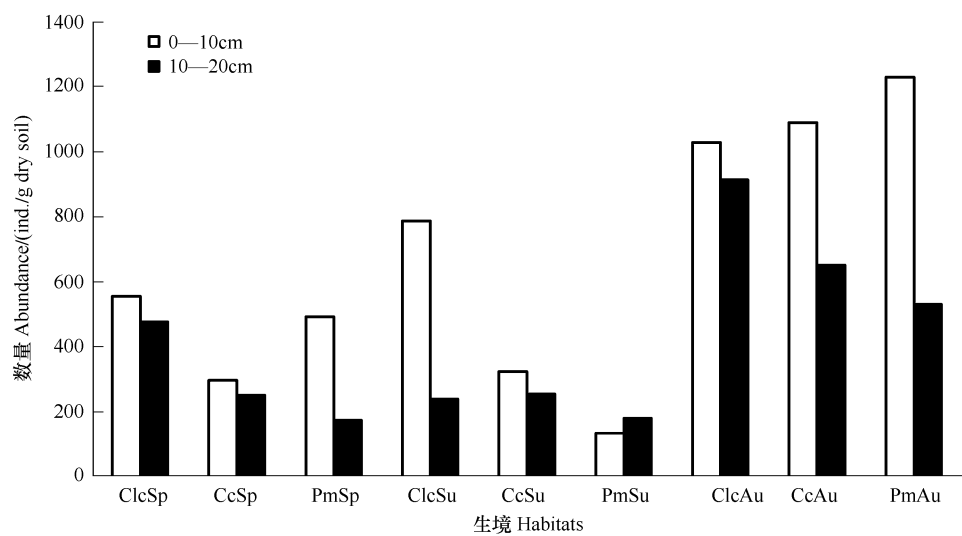


图 1 不同植被恢复阶段土壤线虫季节分布(符号代表含义同表 1)

Fig. 1 Seasonal distribution of soil nematode in the four stages. The code are the same meaning as in Table 1

Sp 春季;Su 夏季;Au 秋季

表 3 不同恢复阶段土壤线虫群落多样性

Table 3 Diversity of soil nematode communities in different restoration stages			
项目 Item	混交林 Clc	阔叶林 Cc	针叶林 Pm
多样性指数 Diversity index(<i>H'</i>)	1.4807	2.5503	2.3546
均匀度指数 Evenness index(<i>J</i>)	0.5459	0.8906	0.8582
丰富度指数 Richness index(<i>SR</i>)	1.5131	2.8598	2.6531
优势度指数 Dominance index(<i>C</i>)	0.1165	0.1090	0.1400
营养多样性指数 Trophic diversity index(<i>TD</i>)	1.6934	2.7657	2.3200

表 4 不同恢复阶段土壤线虫功能类群特征

Table 4 Characteristics of functional groups of soil nematode communities in different restoration stages			
	混交林 Clc	阔叶林 Cc	针叶林 Pm
Wasilewska index (<i>WI</i>)	1.63	3.09	8.97
<i>f/b</i>	0.13	0.27	0.15
自由生活线虫成熟度指数(<i>MI</i>) maturity index	1.48	2.55	2.36
植物寄生线虫成熟度指数(<i>PPI</i>) plant parasite index	1.59	2.57	2.45
总成熟度指数(<i>MMI</i>) Total maturity index	1.63	2.55	2.47
<i>PPI/MI</i>	1.07	1.01	1.04
<i>MI2-5</i>	3.10	3.64	3.17
结构指数 Structural index (<i>SI</i>)	32.28	49.76	44.43
富集指数 Enrichment index (<i>EI</i>)	12.16	27.78	17.48
基础指数 Basal index (<i>BI</i>)	24.78	36.21	40.59
线虫通路指数 Nematode Channel Ratio (<i>NCR</i>)	0.57	0.83	0.88

可以看出,各恢复阶段 *WI* 指数、*BI* 指数和 *NCR* 指数均表现为:针叶林 > 阔叶林 > 混交林,表明各恢复阶段均以真菌通道为主,而针叶林尤为明显。而 *f/b* 值、*MI* 指数、*PPI* 指数、*MMI* 指数、*MI2-5* 指数、*SI* 指数和 *EI* 指数均表现为:阔叶林 > 针叶林 > 混交林,而 *PPI/MI* 指数则表现为:混交林 > 针叶林 > 阔叶林。而且,各恢复阶段 *EI* 指数、*SI* 指数都小于 50,表明土壤养分状况较差而且受干扰程度也高,已对环境造成胁迫,食物网退化。

3.3 线虫对土壤理化性质变化的响应

由表 5 可以看出,不同的土壤理化性质对不同的线虫数量、属数、生态指数的影响不同。土壤含水量与线虫数量、绕线属、真矛属具有显著的负相关关系,而与 *SI* 有显著的正相关关系;有机质则与螺旋属、属数和 *PPI/MI* 有显著正相关关系;铵态氮与 *MI2-5*、*SI*、*EI* 和 *PPI/MI* 有显著的正相关关系;硝态氮与 *NCR* 有显著的负相关关系,而与 *f/b* 有显著的正相关关系;速效钾与多样性指数(*H'*)、营养多样性指数(*TD*)和属数有显著正相关关系,而与优势度指数(*C*)有显著负相关关系;速效磷与 *MI2-5* 有显著正相关关系。这反映了植被恢复过程中土壤线虫群落对土壤根系及其理化性质变化的响应。

表 5 线虫数量、属数、生态指数与土壤理化指标的相关分析

Table 5 Correlation coefficients (*r*) between the number of nematode, number of genera, ecological indices and soil physico-chemical properties

	土壤含水率 Soil moisture	有机质 Organic matter	铵态氮 N-NH ₃	硝态氮 N-NO ₃	速效钾 Available K	速效磷 Available P
线虫数量 Number of nematode	-0.605 **	0.355	-0.191	-0.333	-0.021	0.088
属数 Number of genera	-0.071	0.654 **	0.111	-0.223	0.492 *	-0.055
各恢复阶段优势属 The dominant genera in different restoration stages						
绕线属 <i>Plectus</i>	-0.629 **	0.112	-0.413	-0.389	-0.343	-0.096
<i>Filenchus</i>	-0.160	0.382	0.108	-0.328	-0.114	0.371
真矛属 <i>Eudorylaimus</i>	-0.495 *	0.154	-0.246	-0.319	-0.108	0.126
螺旋属 <i>Helicotylenchus</i>	0.086	0.602 **	0.217	-0.125	0.431	-0.109
生态指数 Ecological indices						
多样性指数(<i>H'</i>) Diversity index	0.144	0.462	0.185	0.069	0.591 **	0.014
均匀度指数(<i>J</i>) Evenness index	0.272	0.006	0.142	0.394	0.433	0.076
丰富度指数(<i>SR</i>) Richness index	0.373	0.386	0.214	-0.087	0.431	-0.194
优势度指数(<i>C</i>) Dominance index	0.011	-0.258	-0.019	-0.191	-0.481 *	0.047
营养多样性指数(<i>TD</i>) Trophic diversity index	-0.039	0.256	0.143	0.314	0.536 *	0.381
Wasilewska index (<i>WI</i>)	-0.071	-0.392	-0.254	-0.003	-0.453	-0.439
<i>f/b</i>	-0.136	-0.407	-0.031	0.717 **	0.256	0.352
自由生活线虫成熟度指数(<i>MI</i>) maturity index	-0.080	-0.113	-0.324	0.302	0.080	-0.003
植物寄生线虫成熟度指数(<i>PPI</i>) plant parasite index	0.410	0.449	0.320	0.050	0.403	-0.178
总成熟度指数(<i>MMI</i>) Total maturity index	0.073	0.029	-0.133	0.377	0.271	-0.065
<i>PPI/MI</i>	0.399	0.470 *	0.494 *	-0.167	0.296	-0.128
<i>MI2-5</i>	0.264	0.219	0.534 *	-0.195	0.164	0.495 *
结构指数(<i>SI</i>) Structural index	0.611 **	0.011	0.548 *	0.224	0.303	0.398
富集指数(<i>EI</i>) Enrichment index	0.257	0.219	0.693 **	0.213	0.443	0.376
基础指数(<i>BI</i>) Basal index	-0.039	-0.198	-0.165	-0.147	-0.253	-0.262
线虫通路指数(<i>NCR</i>) Nematode Channel Ratio	-0.032	0.291	-0.141	-0.620 **	-0.281	-0.449

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$; $n = 18$

4 讨论

本研究结果表明,土壤线虫群落的时空分布格局在不同恢复阶段存在显著差异,反映了线虫群落对植被恢复的不同响应。这些差异可能与不同线虫的生物学特性、可获得食物资源的数量和质量以及土壤理化性质的变化相关联^[29]。

调查发现绕线属为优势属,不同植被恢复阶段线虫优势属表现出一定的差异性,其中,阔叶林和针叶林只有一个优势属,而混交林有 3 个优势属,这可能与不同恢复阶段凋落物种类、土壤食物网结构以及受干扰程度有关。稀有类群在各演替阶段中出现了 15, 17 属和 18 属,说明其分布范围并不狭小,因此它们对植被演替的作用不容忽视。

一般情况下,土体中土壤动物类群数量和个体数量的垂直分布具有表聚性^[28]。这主要因为土壤动物的垂直分布受土壤理化性质和营养状况的制约,0—10cm 土层正是植物根系分布区,土壤相对疏松,通气性好,营养丰富,因而土壤动物相对增多,本研究的结果也正体现了这种规律,0—10cm 土层线虫数量多于 10—20cm 土层的。对植物寄生线虫而言,植物根系是影响其分布的主要因素之一。本研究中,螺旋属与有机质呈极显著正相关,正体现了这一规律。

线虫对季节变化的响应主要是由植被下形成的微环境中的温度、湿度、食物供应、种群内竞争以及捕食等综合作用所决定的^[30]。水热不均是抑制线虫数量的重要因素。本研究中,各恢复阶段的土壤线虫个体密度均为秋季明显高于夏季和春季,这可能与该地区秋季温度、土壤含水量的特征相关联,秋季降雨量低于夏季和春季,本研究中线虫数量与土壤含水量成显著负相关关系正体现了这一规律。同时实验结论表明线虫与土壤理化性质主要指标显著相关,这使利用线虫指示土壤质量具备了坚实的基础。

土壤线虫常被看作是反映生态系统受到各种干扰的敏感性指示生物。功能类群指数是敏感指标之一。*MI* 指数和 *PPI* 指数最早由 Bongers 提出,反映土壤线虫群落功能结构特征,用以评价人为干扰活动对土壤线虫群落的影响。*MI* 指数指示土壤自由生活线虫 *r*-选择和 *k*-选择的比例,显示线虫的生活周期、繁殖力和抗干扰能力的强弱;*PPI* 指数则指示植物寄生线虫 *r*-选择和 *k*-选择的比例,反映植物寄生线虫的抗干扰能力和繁殖能力。后来 Yeates 又提出了 *MMI* 指数。*PPI/MI* 值的应用是 Bongers1997 年提出的,他认为耕作和施肥会使土壤线虫群落 *PPI/MI* 值升高,未受扰动的自然环境的土壤线虫群落 *PPI/MI* 值将低于耕作土壤,在一定条件下 *PPI/MI* 值反映土壤生态系统对外界干扰恢复程度可能更敏感^[31]。Kandij 等认为,未受扰动的生态系统中土壤线虫多样性较高。从表 3、表 4 数据可以看出,混交林区受扰动要比针叶林区和阔叶林区明显。

类群属数、个体密度、群落多样性指数和功能类群指数是评价土壤线虫群落结构变化的量化指标,上述不同指数组成的指标能够一定程度反映群落环境质量状况。本文通过研究土壤线虫类群属数、个体密度、群落多样性指数和功能类群指数反映不同植被恢复阶段生境间的差异,也反映了当地植被恢复的水平,而且体现了土壤生物对环境变化的响应。

References:

- [1] Freckman D W. Bacterivorous nematodes and organic matter decomposition. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1988, 24(1/3):195-212.
- [2] Hu F, Li H X, Xie L Q, Wu S M. Interactions of bacterivorous nematode and bacteria and their effects on mineralization-immobilization of nitrogen and phosphorous. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(6):914-920.
- [3] Ingham R E, Irofymow J A, Ingham E R, Coleman D C. Interactions of bacteria, fungi, and their nematode grazers effects of nutrient cycling and plant growth. *Ecological Monographs*, 1985, 55(1):119-140.
- [4] Powers L E, Freckman D W, Virginia R A. Spatial distribution of nematodes in polar desert soils of Antarctica. *Polar Biology*, 1995, 15(5):325-333.
- [5] Ritz K, Trudgill D L. Utility of nematode community analysis as an integrated measure of functional state of soils: perspectives and challenges. *Plant and Soil*, 1999, 212(1):1-11.
- [6] Bongers T. The maturity index: an ecological measure of environmental disturbance based an nematode species composition. *Oecologia*, 1990, 83(1):14-19.
- [7] Wasilewska L. Soil invertebrates as bioindicators, with special reference to soil-inhabiting nematodes. *Russian Journal of Nematology*, 1997, 5:113-126.
- [8] Yeates G W, Wardle D A, Watson R. Responses of soil nematode populations, Community structure, diversity and temporal variability to agricultural intensification over a seven-year period. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31:1721-1733.
- [9] Wardle D D, Yeates G W, Watton R N, Nicholson K S. The detritus food-web and the diversity of soil fauna as indicators of disturbance regimes in agro-ecosystems. *Plant and Soil*, 1995, 170(1):35-43.
- [10] Freckman D W, Virginia R A. Low-diversity Antarctic soil nematode communities; distribution and response to disturbance. *Ecology*, 1997, 78(2):363-369.
- [11] Yeates G W, Newton P C D, Ross D J. Response of soil nematode fauna to naturally elevated CO₂ Levels influenced by soil pattern. *Nematology*, 1999, 1(3):285-293.

- [12] Hanel L. Recovery of soil nematode populations from cropping stress by natural secondary succession to meadow land. *Applied Soil Ecology*, 2003, 22(3): 255-270.
- [13] Pate E, Ndiaye-Faye N, Thioulouse J, Villenave C, Bongers T, Cate P, Debouzie D. Successional trends in the characteristics of soil nematode communities in cropped and fallow lands in Senegal (sonkorong). *Applied Soil Ecology*, 2000, 14(1): 5-15.
- [14] Li H X, Liu M Q, Hu F, Chen X Y, He Y Q. Nematode abundance under different vegetations restored on degraded Red Soil. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(11): 1882-1889.
- [15] Panesar T S, Marshall V G, Barclay H J. Abundance and diversity of soil nematode in chronosequences of coastal Douglas-fir forests on Vancouver island, British Columbia. *Pedobiologia*, 2001, 45(3): 193-212.
- [16] Sohlenius B B, Bostrom S, Sandor A. Long-term dynamics of nematode communities in arable soil under four cropping systems. *Journal of Applied Ecology*, 1987, 24: 131-144.
- [17] Freckman D W, Ettema C H. Assessing nematode communities in Agri-ecosystems of varying human intervention. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1993, 45(3/4): 239-261.
- [18] Fu S L, Coleman D C, Hendrix P F, Crossley Jr D A. Responses of trophic groups of soil nematodes to residue application under conventional tillage and no-till regimes. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(11): 1731-1741.
- [19] Ferris H, Venette R C, Scow K M. Soil management to enhance bacterivore and fungivore nematode populations and their nitrogen mineralization function. *Applied Soil Ecology*, 2004, 25(1): 19-35.
- [20] Wasilewska L. Changes in the structure of the soil nematode community over long-term secondary grassland succession in drained fen peat. *Applied Soil Ecology*, 2006, 32: 165-179.
- [21] Wang Z Z, Zhang Y M, Wu H S. Study towards the eco-geographic community of Mountain soil Nematoda in the middle of Hunan. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 1992, 15(3): 72-78.
- [22] Hu F, Lin M S, Wu S M. Characteristics of nematode population in low hill red soil ecosystems in central Jiangxi Province, subtropical China// Wang M Z, Zhang T L, He Y Q, eds. *Research on Red Soil Ecosystem*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1993: 177-182.
- [23] Liang W J, Li Q, Jiang Y, Neher D A. Nematode faunal analysis in an aquic brown soil fertilized with slow-release urea, Northeast China. *Applied Soil Ecology*, 2005, 29(2): 185-192.
- [24] Wu J H, Fu C Z, Lu F, Chen J K. Changes in free-living nematode community structure in relation to progressive land reclamation at an intertidal marsh. *Applied Soil Ecology*, 2005, 29(1): 47-58.
- [25] Xie H. Taxonomy of plant nematodes. Beijing: Higher Education Press, 2005: 40.
- [26] Yin W Y. Pictorial keys to soil animals of China. Beijing: Science Press, 1998: 51-89, 437-475.
- [27] Liang W J, Chen L J, Li Q. Responses of nematode communities to inorganic fertilizer disturbance in a farmland ecosystem. *Pedosphere*, 2002, 12(3): 193-200.
- [28] Yin X Q, Wang H X, Zhou D W. Characteristics soil animals communities in different agricultural ecosystem in the Songnen Grassland of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(6): 1071-1078.
- [29] Norton D C, Niblack T L. Biology and ecology of nematodes// Nickle W R. *Manual of Agricultural Nematology*. New York: Marcel Dekker Inc, 1991: 47-71.
- [30] Freckman D W, Baldwin J G. Nematode// Dindal D L. *Soil Biology Guide*. New York: John Wiley and Sons Inc, 1990: 155-200.
- [31] Bongers T, van der Meulen H, Korthals G. Inverse relationship between the nematode maturity index and plant parasite index under enriched nutrient conditions. *Applied Soil Ecology*, 1997, 6(2): 195-199.

参考文献:

- [2] 胡锋, 李辉信, 谢涟琪, 吴珊眉. 土壤食细菌线虫与细菌的相互作用以及对 N、P 矿化-生物固定的影响及机理. *生态学报*, 1999, 19(6): 914-920.
- [14] 李辉信, 刘满强, 胡锋, 陈小云, 何圆球. 不同植被恢复方式下红壤线虫数量特征. *生态学报*, 2002, 22(11): 1882-1889.
- [21] 王振中, 张友梅, 伍惠生. 湘中山地土壤线虫生态地理群的研究. *湖南师范大学自然科学学报*, 1992, 15(3): 72-78.
- [22] 胡锋, 林茂松, 吴珊眉. 江西中部亚热带低山红壤生态系统线虫种群特征// 王明珠, 张桃林, 何圆球, 编. *红壤生态系统研究 (第二集)*. 北京: 中国农业科技出版社, 1993: 177-182.
- [25] 谢辉. *植物线虫分类学*. 北京: 高等教育出版社, 2005: 40.
- [26] 尹文英. *中国土壤动物检索图鉴*. 北京: 科学出版社, 1998: 51-89, 437-475.
- [28] 殷秀琴, 王海霞, 周道玮. 松嫩草原区不同农业生态系统土壤动物群落特征. *生态学报*, 2003, 23(6): 1071-1078.