

DOI: 10.5846/stxb201806101296

尹海锋, 苏宇, 郭茂金, 李贤伟, 范川, 刘思泽, 李相君. 目标树经营初期对柏木人工林土壤线虫群落的影响. 生态学报, 2019, 39(10): - .
Yin H F, Su Y, Guo M J, Li X W, Fan C, Liu S Z, Li X J. Effects of early crop-tree release on soil nematode communities in a *Cupressus funebris* plantation. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(10): - .

目标树经营初期对柏木人工林土壤线虫群落的影响

尹海锋¹, 苏宇¹, 郭茂金¹, 李贤伟^{1,2,*}, 范川^{1,2}, 刘思泽¹, 李相君¹

¹ 四川农业大学林学院, 成都 611130

² 长江上游森林资源保育与生态安全国家林业局重点实验室, 成都 611130

摘要:为研究目标树经营初期对柏木人工林土壤线虫群落的影响,对遂宁市安居区处于竞争生长阶段的柏木林进行 3 种不同密度目标树经营,共计样地 12 个(目标树密度为 6 株/667 m²、9 株/667 m²、12 株/667 m²以及对照各 3 个)。在目标树经营 1 年后,采集春、夏、秋、冬 4 个季节样品共 252 个,采用改进的 Baermann 湿漏斗法分离土壤线虫,共鉴定出土壤线虫 59 科 143 属。其中 *Prionchulus* 为优势属,食细菌性线虫 38 属,食真菌性线虫 12 属,植食性线虫 36 属,杂食/捕食性线虫 57 属。土壤线虫生活史策略以 c-p 4 类群为主,占总数的 44.33%,其中目标树密度为 9 株/667 m²整个样地(9N)的 c-p 4 占比最大。目标树经营增加了土壤线虫的数量,目标树密度为 9 株/667 m²的目标树单株(9C)线虫密度达到最大;目标树经营处理中均以杂食/捕食性线虫数量最多,其中 9C 杂食/捕食性线虫数量均高于其它处理;目标树经营提高了多样性指数(*H'*)、均匀度指数(*J*)、线虫营养多样性指数(*TD*)、线虫成熟度指数(*MI*),目标树经营改善了土壤线虫群落结构,其中目标树密度为 9 株/667 m²样地的土壤线虫群落结构最优。研究结果表明,采用目标树经营有利于提升土壤线虫群落多样性,使柏木人工林生态系统向更稳定的方向发展,其中目标树密度为 9 株/667 m²的效果最为显著。

关键词:土壤线虫;群落结构;目标树经营;柏木人工林

Effects of early crop-tree release on soil nematode communities in a *Cupressus funebris* plantation

YIN Haifeng¹, SU Yu¹, GUO Maojin¹, LI Xianwei^{1,2,*}, FAN Chuan^{1,2}, LIU Size¹, LI Xiangjun¹

¹ College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

² Key Laboratory of Forest Resources Conservation and Ecological Security in the Upper reaches of the Yangtze River, Chengdu 611130, China

Abstract: To study the impact of crop-tree release on the soil nematode community in a *Cupressus funebris* plantation, 12 plots were selected from the cedar forest of Anju District, Suining City (crop tree density 6 trees/667 m², 9 trees/667 m², and 12 trees/667 m², and a control group for each of the three), 252 samples from four seasons (spring, summer, autumn, and winter) were collected, and a total of 143 genera belonging to 59 families were identified. Among them, *Prionchulus* was a dominant genus, Bacterivores were represented by 38 genera, fungivores by 12 genera, plant parasites by 36 genera, and omnivores/predators by 57 genera. The soil nematode colonizer persister was dominated by c-p 4 groups, accounting for 44.33% of the total. Among these, the whole plot with crop tree density of 9 trees/667 m² (9N) had the largest proportion of c-p 4. The crop-tree release increased the number of soil nematodes. Among these, the crop trees with a crop tree density of 9 trees/667 m² (9C) had the maximum nematode density. The number of omnivore/predator nematodes was highest in the crop-tree release, and the number of 9C omnivore/predator nematodes was higher than that of the other treatments. The crop-tree release increased the Shannon-Wiener index (*H'*), Pielou evenness index (*J*), Trophic Diversity

基金项目:德国政府贷款四川林业可持续经营管理项目(G1403083);科技部 2017 年度专项项目(2017YFD0600302-05)

收稿日期:2018-06-10; 网络出版日期:2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lxw@sicau.edu.cn

(*TD*), and Maturity index (*MI*), which showed that the crop-tree release increased the diversity of soil nematode communities, and the crop tree density 9 had the best soil nematode community structure. The results showed that the use of crop-tree release was conducive to the enhancement of the diversity of soil nematode communities and the development of a *Cupressus funebris* plantation ecosystem to a more stable direction. Among these, the crop tree density of 9 trees/667 m² had the most significant effect.

Key Words: soil nematodes; community structure; crop-tree release; *Cupressus funebris* plantation

森林是陆地生态系统的主体,是自然界最全面完善的基因库、资源库、能源库,在生态环境的改善,生态平衡的维护,人类生存发展的环境基础方面发挥着不可替代的作用^[1-2]。森林可持续经营和多功能林业要求森林经营朝着近自然的方向发展^[3],更多地利用天然更新实现混交异龄林分结构和森林的连续覆盖^[4],基于单株林木的目标树经营是实现近自然森林经营的重要途径^[5],同时也是营造工业原料林、珍稀树种和大径级用材林等国家储备林的重要经营模式^[6]。

土壤线虫是土壤动物中的重要类群,作为森林生态系统的重要功能组分^[7-9],使土壤成为具有生物活性的活体和潜在的可持续利用的自然资源,对森林土壤生态系统的物质循环和能量流动,及地上植物群落的结构、功能和演替起着重要调控作用^[10-12]。土壤线虫具有生存及适应能力强、营养类群多样、能够敏感地反映生境的优越程度,生活周期较短等优点,其群落组成及结构的变化对生态系统服务及功能产生重要影响,被广泛认为是土壤中的典型指示生物^[13-19]。目前,关于森林土壤线虫的研究主要集中在不同森林类型的调查^[20-25],而森林的人为干扰对土壤线虫群落的影响研究较少^[26-27]。

四川省作为国家储备林项目的重要承储省份,其中柏木(*Cupressus funebris*)作为重要的培育树种之一^[28]。本研究以川中丘陵区柏木人工林为研究对象,通过对柏木人工林目标树经营初期土壤线虫群落的研究,试图阐明土壤线虫对目标树经营的响应机制,探讨其在川中丘陵区柏木人工林生态功能提升的环境指示意义,以期为四川营造大径级用材林以及柏木人工林生态效益的发挥提供理论依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究地区概况

研究区位于遂宁市安居区玉丰镇(30°25'06"N,105°32'19"E),属于川中丘陵区,地质构造简单,地貌类型单一,海拔在300—600 m之间。属亚热带季风气候,气候温和、四季分明,无霜期长,热量充足,雨量充沛。年平均气温为17.4℃,年平均降雨量约930 mm(图1)。

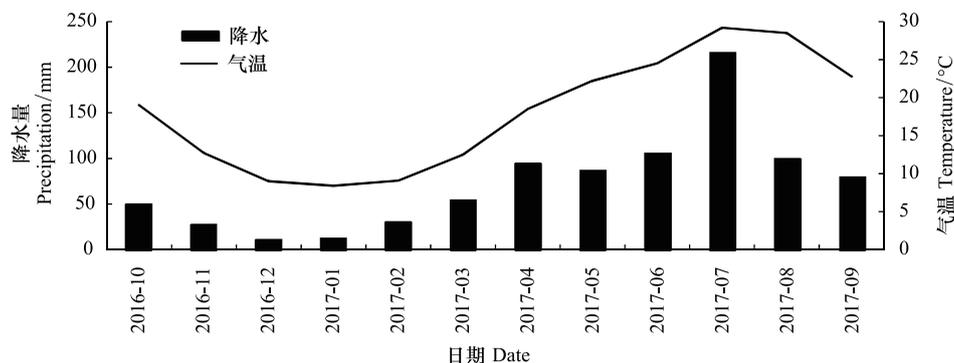


图1 遂宁气温与降水量

Fig.1 Suining temperature and precipitation

本研究选取的林分为1990年长防林造林工程所造柏木纯林,未进行过任何林业经营措施和抚育管理,加

上林分人为干扰较小,林区生态系统以自然更新为主。由于初植密度较大,导致林分结构单一,抵抗病虫害能力较低,林下生物物种单一,生物多样性匮乏。林分密度为 1667 株/hm²,郁闭度高达 0.7 以上,但是林分平均胸径只有 12.0 cm,平均树高 8.0 m,远低于国内平均水平,林木生长不良,卫生状况极差,其生态功能处于退化状态。地表灌木较少,草本盖度为 75%,植被主要有铁仔(*Myrsine africana*)、黄荆(*Vitex negundo*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)、地果(*Ficus tikoua*)、金星蕨(*Parathelypteris glanduligera*)、莎草(*Cyperus*)等。地表凋落物以柏木的枝叶为主,厚度较薄,约为 0—2 cm,部分地表裸露。

1.2 样地的设定

1.2.1 目标树经营措施

研究区柏木林分的目标树经营标准参照“德国政府财政贷款四川省林业可持续经营管理项目”专家组技术标准执行:分别在 667 m²的样地内选取 6 株、9 株、12 株柏木作为目标树,并采伐掉影响目标树生长的干扰树,同时保留未干扰目标树生长的一般林木。目标树样地内每棵目标树之间保持一定的间距(表 1),且尽量呈现均匀分布(图 2),减少目标树受其它林木干扰,促进目标树生长。目标树经营后柏木林分密度保持在 1350 株/hm²。

目标树:可长期保留、完成天然下种更新并达到目标直径后才采伐利用的林木^[29]。

干扰树:以目标树为中心,树冠与目标树接触或者一定距离内(对目标树生长产生干扰)的周围林木。

一般林木:采伐掉干扰树后,林分中除目标树以外的其它一般树木。

1.2.2 试验地设置

2015 年 10 月,选择立地条件和林分状况基本一致的 12 个样地,每个面积为 667 m²(25.82 m×25.82 m),分别设置目标树密度为:6 株/667 m²、9 株/667 m²、12 株/667 m²各 3 个样地,以及 3 个对照样地。每个样地间隔 5 m 以上。目标树采用在胸径位置用红油漆标记,样地边界采用白油漆标记。

试验设置 3 种目标树密度(6 株、9 株、12 株)和对照(即未进行目标树经营的样地),共 4 种处理(表 1)。

表 1 目标树数量与距离

Table 1 The number and distance of crop tree

| 目标树株数 Crop tree number/667 m ² | 目标树株数 Crop tree number/ hm ² | 目标树之间距离 Distance between crop tree/m | 处理 Treatment | |
|--|--|---|--------------------|--------------------|
| | | | 目标树单株 Crop tree | 整个样地 Whole plot |
| — | — | — | CK | CK |
| 6 | 100 | 10×10 | 6C | 6N |
| 9 | 150 | 8.5×8.5 | 9C | 9N |
| 12 | 200 | 7×7 | 12C | 12N |

CK:未进行目标树经营,No crop-tree release;6C:目标树密度为 6 株/667 m²样地的目标树单株,The crop trees with a crop tree density of 6 trees /667 m²;6N:目标树密度为 6 株/667 m²样地的整个样地,The whole plot with crop tree density of 6 trees /667 m²;9C:目标树密度为 9 株/667 m²样地的目标树单株,The crop trees with a crop tree density of 9 trees /667 m²;9N:目标树密度为 9 株/667 m²样地的整个样地,The whole plot with crop tree density of 9 trees /667 m²;12C:目标树密度为 12 株/667 m²样地的目标树单株,The crop trees with a crop tree density of 12 trees /667 m²;12N:目标树密度为 12 株/667 m²样地的整个样地,The whole plot with crop tree density of 12 trees /667 m²

1.3 样品的采集及测定

在采用目标树经营 1 年后,于 2016 年 10 月(秋)、2017 年 1 月(冬)、4 月(春)、7 月(夏),在 4 种处理的样地内采集 3 层样品:凋落物层采集 10 cm×10 cm,土壤用直径为 5 cm 的土壤动物采集器^[30]分别取 0—10 cm 和 10—20 cm 两层土壤。

在目标树保留 6 株、9 株、12 株的每个样地采集两种样品(图 2):

(1)第一种代表目标树单株状况,采样方法是在每个样地内随机选取 3 棵目标树,在其冠幅垂直投影内且距离树干 50 cm 的区域采样,每棵目标树采集 2 个点,将其 6 个点的样品分层混合成 1 个样品;

(2)第二种代表整个样地的状况,采样方法是在样地内随机选取 6 处采样,将其 6 处的样品分层混合成 1

个样品。

在对照样地随机选取 6 处采样,并分层混合成 1 个样品。在每种处理的另外两个重复样地采用相同的方式采样,一共采集 252 个样品。

目标树保留 6 株、9 株、12 株样地采集的第一种样品标记为 6C、9C、12C,采集的第二种样品标记为 6N、9N、12N;在对照样地采集的样品标记为 CK。将样品当日带回实验室分离土壤线虫,并立即测定土壤含水量和土壤容重;待土壤风干后,测定全氮、全磷、pH 和有机质含量^[31]。

每个凋落物样品称取 10 g,土壤样品称取 50 g,采用改进的 Baermann 湿漏斗法^[32]提取土壤线虫,每份样品做 3 个重复。用体视显微镜(Olympus SZX12)进行土壤线虫计数,用显微镜(Olympus BX51)根据线虫的形态特征,将线虫鉴定到属,并将线虫个体数量转化成条/100 g 干土。

土壤线虫的分类鉴定:参照《DE NEMATODEN VAN NEDERLAND》、《SOIL AND FRESHWATER NEMATODES》、《中国土壤动物检索图鉴》和“nematode.unl.edu”线虫图片库,将各个属的特征和照片提取出来,进行整理,并做成一个更加完善的分类系统,利用此分类系统再对土壤样品中分离的土壤线虫进行鉴定。

根据线虫的取食类群和食道特征将其划分为:食细菌线虫(Bacterivores)、食真菌线虫(Fungivores)、植食性线虫(Plant parasite)以及捕食/杂食线虫(Predators/Omnivores)4 大营养类群^[33]。

1.4 数据处理与统计分析

按照线虫个体数量进行优势度的划分:个体数量占总体数量 10% 以上的为优势类群(+++),个体数量占总体数量 1%—10% 的为常见类群(++),个体数量占总体数量 1% 以下的为稀有类群(+),未出现的类群用(-)表示。根据线虫不同的生活史策略,将土壤线虫划分为 5 个 colonizer persister(c-p)类群,分类参考 Neher 等^[34]。

分析土壤线虫群落结构采用以下几个指标:

多样性指数 Shannon-Wiener index(H')

$$H' = \sum_{i=1}^s p_i \ln p_i$$

式中, S 表示总的物种数, p_i 表示第 i 个种占总数的比例。

均匀度指数 Pielou evenness index(J)

$$J = \frac{H'}{H'_{\max}}$$

式中, H' 为香农指数, H'_{\max} 是 H' 的最大值。

$$H'_{\max} = - \sum_{i=1}^s \frac{1}{s} \ln \frac{1}{s} = \ln S$$

式中, S 表示总的物种数。

优势度指数 Simpson index(λ)

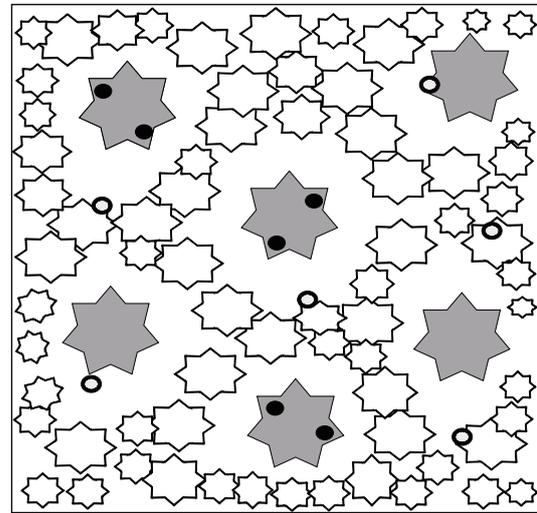


图 2 采样点示意图

Fig.2 Sampling point diagram

灰色树为目标树,The gray tree are the crop tree;白色树为一般林木,The white tree are the genial tree;●为目标树冠幅垂直投影内采样点(第一种样品),represents the sampling point within the crown width vertical projection of the crop tree (first sample);○为样地内随机采样点(第二种样品),represents a random sampling point in the plot (second sample)

$$\lambda = \sum_{i=1}^s p_i^2$$

式中, S 表示总的物种数, p_i 表示第 i 个种占总数的比例。

总丰富度指数 Margalef's richness (D)

$$D = \frac{s - 1}{\ln n}$$

式中, S 是系统中物种数目, n 是样品中物种总个体数。

线虫营养多样性指数 Trophic Diversity (TD)

线虫营养多样性指数可以指示线虫营养类群的相对多度和均匀度,公式如下:

$$TD = \frac{1}{\sum p_i^2}$$

式中, p_i 为个营养类群在线虫群落中所占的比例。线虫营养多样性指数的大小能够反映出线虫食性多样性的高低。

线虫成熟度指数 Maturity index (MI)

$$MI = \sum v(i) \cdot f(i)$$

式中, i 是根据线虫的生活策略进行分组的组别, $v(i)$ 是按照线虫属于 K -选择到 r -选择分别赋予的 $c-p$ 值, $f(i)$ 是自由生活线虫属在线虫种群中所占的比重。

线虫通路比值 Nematoda Channel Ratio (NCR)

$$NCR = \frac{B}{(B + F)}$$

式中, B 代表食细菌线虫占线虫总数的相对多度, F 代表食真菌线虫占线虫总数的相对多度, NCR 的值在 1 和 0 之间波动,1 为完全由细菌控制 (totally bacterial-mediated), 0 为完全由真菌控制 (totally fungal-mediated)。

采用 Excel 2013 进行数据的整理和计算;使用 SPSS 20.0 软件对数据进行方差分析 ANOVA, CK 与目标树经营各处理的土壤理化性质差异显著性检验采用 Least-Significant Difference (LSD) 方法,不同处理和不同季节的土壤线虫属数量、密度、营养类型和生态学指数采用 Duncan's multiple range test (Duncan) 方法;采用 Origin 8.0 做图;土壤线虫群落结构与环境之间的相关分析,采用 Canoco for Windows 4.5 软件进行冗余分析 (Redundancy analysis, RDA)。

2 结果与分析

2.1 目标树经营对土壤理化性质的影响

采用 ANOVA 分析 CK 与目标树经营各处理的差异,差异显著性检验采用最小极差法 (LSD) 方法,结果表明目标树经营对土壤理化性质的影响较大(表 2)。土壤含水量呈现 N(整个样地)比 C(目标树单株)含水量高,CK 显著高于 C($P < 0.05$)。土壤容重在目标树经营样地 9N 中较 CK 有显著下降($P < 0.05$),其余处理均未降低。采用目标树经营的有机质含量显著高于 CK($P < 0.05$),在 3 种目标树保留密度的样地中均呈现出 C 较 N 的有机质含量高,但差异不显著($P > 0.05$)。全磷只有 6C 和 9N 较 CK 有所提高,全氮各处理与 CK 差异不显著($P > 0.05$)。12N 与 CK 的 pH 差异不显著($P > 0.05$),其余处理与 CK 样地的 pH 差异显著($P < 0.05$),且采用目标树经营后的土壤 pH 趋向中性。

2.2 土壤线虫科属及营养类群

从 4 个季节的柏木人工林土壤样品中共分离出 15945 条线虫,平均密度凋落物中为 4253 条/100 g,土壤中为 159 条/100 g 干土,共鉴定出 59 科 143 属。*Prionchulus* 为优势属,其个体数量占总数的 10.46%,*Enchodelus*、*Panagrolaimus* 等为常见属,占总数的 58.31%,*Longidorella*、*Paraxonchium* 等为稀有属,占总数的

31.12%, 未知 17 条, 占总数的 0.11%。食细菌性线虫 (Bacterivores) 有 38 属, 食真菌性线虫 (Fungivores) 有 12 属, 植食性线虫 (Plant parasite) 有 36 属, 杂食/捕食性线虫 (Omnivores/Predators) 有 57 属 (表 3)。

表 2 不同处理的土壤理化性质

Table 2 Different treatments of soil physicochemical properties

| 处理 Treatment | 含水量 Moisture content/% | 土壤容重 Bulk density/ (g/cm ³) | 土壤有机质 Organic matter/ (g/kg) | 全磷 Total phosphorus/ (g/kg) | 全氮 Total nitrogen/ (g/kg) | pH |
|-----------------|------------------------------|---|------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|------------|
| CK | 24.52±0.19a | 1.652±0.027a | 12.71±0.22a | 0.792±0.012a | 1.594±0.321a | 7.61±0.02a |
| 6C | 20.37±0.25b | 1.731±0.017b | 14.28±0.34b | 0.868±0.033b | 1.431±0.119a | 6.68±0.03b |
| 6N | 23.94±0.27b | 1.676±0.020a | 14.02±0.20b | 0.729±0.067a | 1.256±0.077a | 7.11±0.05b |
| 9C | 19.08±0.24b | 1.657±0.017a | 14.84±0.32b | 0.556±0.026b | 1.511±0.300a | 7.26±0.05b |
| 9N | 27.04±0.20b | 1.564±0.037b | 14.19±0.27b | 0.850±0.040a | 1.334±0.139a | 7.27±0.04b |
| 12C | 23.28±0.19b | 1.643±0.048a | 14.66±0.27b | 0.689±0.023b | 1.340±0.182a | 7.75±0.02b |
| 12N | 23.42±0.46b | 1.797±0.008b | 13.72±0.44b | 0.582±0.027b | 1.292±0.059a | 7.62±0.02a |

平均值±标准差; 同列数据后不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$, LSD)

表 3 不同处理土壤线虫群落组成及营养类群 c-p 值

Table 3 Different treatment of soil nematode community composition and nutritional group c-p value

| 属 Genus | 营养类型* Putative feeding | c-p 值** c-p Class | 优势度 Dominance | | | | | | |
|------------------------------------|---------------------------|----------------------|---------------|----|----|----|-----|-----|-----|
| | | | 6C | 6N | 9C | 9N | 12C | 12N | CK |
| 盆咽属 <i>Panagrolaimus</i> | Ba | 1 | +++ | ++ | ++ | + | ++ | ++ | + |
| 明杆属 <i>Rhabditophanes</i> | Ba | 1 | - | ++ | - | - | - | - | ++ |
| 拟鳃线属 <i>Anguilluloides</i> | Ba | 1 | - | ++ | - | - | - | - | ++ |
| 地单宫属 <i>Geomonhystera</i> | Ba | 1 | ++ | + | + | - | ++ | ++ | ++ |
| <i>Diplogasteriana</i> | Ba | 1 | - | - | + | - | - | - | ++ |
| 真单宫属 <i>Eumonhystera</i> | Ba | 1 | + | ++ | + | - | - | + | ++ |
| 小杆属 <i>Rhabditis</i> | Ba | 1 | - | - | - | - | - | ++ | ++ |
| 单宫属 <i>Monhystera</i> | Ba | 1 | - | - | - | ++ | - | - | - |
| 盆咽属 <i>Panagrolaimus</i> | Ba | 1 | ++ | - | - | - | - | - | - |
| 伪双胃属 <i>Pseudodiplogasteriodes</i> | Ba | 1 | - | - | ++ | - | - | - | - |
| 原杆属 <i>Protorhabditis</i> | Ba | 1 | - | ++ | - | - | - | - | + |
| 污结咽属 <i>Tylopharynx</i> | Ba | 1 | - | - | - | - | + | + | - |
| <i>Rhabditoidea</i> | Ba | 1 | + | - | - | - | - | - | + |
| <i>Rhabditella</i> | Ba | 1 | - | - | - | + | - | + | - |
| <i>Diplogasteritus</i> | Ba | 1 | - | - | + | - | - | - | - |
| 中杆属 <i>Mesorhabditis</i> | Ba | 1 | - | - | - | - | + | - | - |
| 哈利头叶属 <i>Halicephalobus</i> | Ba | 2 | ++ | - | - | ++ | - | ++ | ++ |
| <i>Heterocephalobus</i> | Ba | 2 | - | ++ | ++ | ++ | + | ++ | + |
| 似绕线属 <i>Anaplectus</i> | Ba | 2 | - | + | - | - | ++ | - | - |
| <i>Heterocephalobellus</i> | Ba | 2 | - | + | + | - | + | + | - |
| 绕线属 <i>Plectus</i> | Ba | 2 | - | - | - | - | + | - | + |
| 真头叶属 <i>Eucephalobus</i> | Ba | 2 | - | - | + | - | - | + | - |
| 角头属 <i>Tylocephalus</i> | Ba | 2 | - | - | - | - | - | + | - |
| 头叶属 <i>Cephalobus</i> | Ba | 2 | - | - | - | - | + | - | - |
| 棱咽属 <i>Prismatolaimus</i> | Ba | 3 | - | - | + | ++ | - | + | +++ |
| 巴氏属 <i>Bastiania</i> | Ba | 3 | ++ | - | ++ | ++ | - | ++ | + |
| 微咽属 <i>Microaimus</i> | Ba | 3 | - | ++ | ++ | - | - | ++ | ++ |
| <i>Heterorhabditis</i> | Ba | 3 | - | - | - | - | + | ++ | - |
| 连胃属 <i>Chronogaster</i> | Ba | 3 | - | ++ | - | - | - | - | - |

续表

| 属 Genus | 营养类型* Putative feeding | c-p 值** c-p Class | 优势度 Dominance | | | | | | |
|------------------------------|---------------------------|----------------------|---------------|-----|----|-----|-----|-----|-----|
| | | | 6C | 6N | 9C | 9N | 12C | 12N | CK |
| 微线属 <i>Micronema</i> | Ba | 3 | + | - | - | - | - | - | - |
| 畸头属 <i>Teratocephalus</i> | Ba | 3 | - | - | - | + | - | - | - |
| 原色矛属 <i>Prochromadora</i> | Ba | 3 | - | + | - | - | - | - | - |
| <i>Metateratocephalus</i> | Ba | 3 | - | - | - | + | - | + | - |
| <i>Leptolaimus</i> | Ba | 3 | - | - | + | - | + | - | - |
| 无咽属 <i>Alaimus</i> | Ba | 4 | - | ++ | - | ++ | +++ | ++ | - |
| 高杯侧器属 <i>Amphidelus</i> | Ba | 4 | + | + | ++ | ++ | ++ | ++ | ++ |
| <i>Bathyodontus</i> | Ba | 4 | ++ | + | + | - | - | + | - |
| <i>Diplolaimelloides</i> | Ba | 3 | - | + | - | - | - | - | ++ |
| 真滑刃属 <i>Aphelenchus</i> | Fu | 2 | + | - | - | ++ | ++ | ++ | + |
| 伪垫刃属 <i>Nothotylenchus</i> | Fu | 2 | ++ | ++ | ++ | ++ | - | - | - |
| 柄端球属 <i>Paurodontus</i> | Fu | 2 | ++ | ++ | - | - | - | - | - |
| <i>Aprutides</i> | Fu | 2 | - | - | + | - | + | - | - |
| <i>Paraphelenchus</i> | Fu | 2 | - | - | - | + | - | - | - |
| <i>Howardula</i> | Fu | 2 | - | - | - | - | + | - | - |
| <i>Diphtherophora</i> | Fu | 3 | - | - | - | - | + | + | - |
| 拟矛线属 <i>Dorylaimoides</i> | Fu | 4 | - | - | ++ | ++ | ++ | - | - |
| 短矛属 <i>Doryllium</i> | Fu | 4 | + | - | - | - | + | ++ | - |
| 垫咽属 <i>Tylencholaimus</i> | Fu | 4 | + | - | - | + | ++ | + | - |
| 瘤咽属 <i>Tylencholaimellus</i> | Fu | 4 | + | ++ | - | - | - | - | - |
| 细齿属 <i>Leptonchus</i> | Fu | 4 | - | ++ | - | - | - | - | - |
| <i>Pristionchus</i> | OP | 1 | - | + | - | ++ | - | - | - |
| 拟杯咽属 <i>Paracyatholaimus</i> | OP | 3 | - | - | - | - | + | ++ | - |
| 异色矛属 <i>Achromadora</i> | OP | 3 | - | - | - | - | - | - | + |
| 大矛属 <i>Enchodelus</i> | OP | 4 | ++ | ++ | ++ | +++ | + | ++ | ++ |
| 真矛属 <i>Eudorylaimus</i> | OP | 4 | +++ | - | ++ | ++ | ++ | ++ | + |
| <i>Drepanodorylaimus</i> | OP | 4 | + | - | - | - | ++ | ++ | +++ |
| 金线属 <i>Chrysonema</i> | OP | 4 | - | ++ | ++ | - | - | - | - |
| 独壁齿属 <i>Campydora</i> | OP | 4 | - | + | ++ | ++ | + | ++ | - |
| <i>Takamangai</i> | OP | 4 | - | - | - | ++ | ++ | - | - |
| 拟桑尼属 <i>Thorneella</i> | OP | 4 | - | ++ | ++ | + | + | - | - |
| <i>Actinca</i> | OP | 4 | - | - | - | - | ++ | - | + |
| 螯属 <i>Pungentus</i> | OP | 4 | + | ++ | ++ | + | ++ | + | - |
| <i>Microdorylaimus</i> | OP | 4 | ++ | - | - | - | + | - | + |
| <i>Akrotonus</i> | OP | 4 | - | - | - | ++ | - | - | + |
| <i>Oriverutus</i> | OP | 4 | - | - | - | ++ | + | - | - |
| 矛线属 <i>Dorylaimus</i> | OP | 4 | - | ++ | - | - | - | - | - |
| <i>Labronemella</i> | OP | 4 | + | + | - | - | + | - | - |
| <i>Thornenematinae</i> | OP | 4 | + | - | - | - | - | - | ++ |
| <i>Epidorylaimus</i> | OP | 4 | - | - | - | - | + | - | - |
| 角咽属 <i>Actinolaimus</i> | OP | 4 | - | - | + | - | - | - | - |
| 拱唇属 <i>Labronema</i> | OP | 4 | - | - | - | + | - | - | - |
| <i>Talanema</i> | OP | 4 | - | - | + | - | - | - | - |
| 桑尼属 <i>Thornia</i> | OP | 4 | - | - | + | - | - | - | - |
| <i>Tyleptus</i> | OP | 4 | + | - | - | - | - | - | - |
| 孔咽属 <i>Aporcelaimus</i> | OP | 5 | ++ | +++ | ++ | + | ++ | - | ++ |

续表

| 属 Genus | 营养类型* Putative feeding | c-p 值** c-p Class | 优势度 Dominance | | | | | | |
|-----------------------------|---------------------------|----------------------|---------------|----|-----|-----|-----|-----|----|
| | | | 6C | 6N | 9C | 9N | 12C | 12N | CK |
| 中矛线属 <i>Mesodorylaimus</i> | OP | 5 | +++ | ++ | - | ++ | - | + | + |
| <i>Laimydorus</i> | OP | 5 | ++ | - | ++ | - | - | ++ | - |
| <i>Paraxonchium</i> | OP | 5 | + | ++ | ++ | - | - | - | + |
| 前矛线属 <i>Prodorylaimus</i> | OP | 5 | - | ++ | + | + | + | + | - |
| <i>Aporcelaimellus</i> | OP | 5 | + | - | - | - | + | - | + |
| <i>Ecumenicus</i> | OP | 5 | - | - | - | + | + | - | - |
| 扁腔属 <i>Sectonema</i> | OP | 5 | + | - | - | - | - | - | - |
| 齿咽属 <i>Odontopharynx</i> | OP | 1 | + | - | - | - | ++ | - | - |
| 三孔属 <i>Tripyla</i> | OP | 3 | - | - | - | - | + | - | - |
| 锯齿属 <i>Prionchulus</i> | OP | 4 | +++ | ++ | +++ | +++ | ++ | +++ | ++ |
| 单齿属 <i>Mononchus</i> | OP | 4 | ++ | ++ | ++ | ++ | ++ | ++ | - |
| 倒齿属 <i>Anatonchus</i> | OP | 4 | ++ | - | - | ++ | + | + | + |
| 异齿属 <i>Fudonchulus</i> | OP | 4 | ++ | - | - | ++ | - | - | - |
| 单棘属 <i>Mononchulus</i> | OP | 4 | - | ++ | - | - | - | - | + |
| 基齿属 <i>Itonchus</i> | OP | 4 | ++ | + | ++ | + | - | - | - |
| 铯齿属 <i>Mylonchulus</i> | OP | 4 | - | - | - | - | + | ++ | - |
| 等齿属 <i>Miconchus</i> | OP | 4 | - | - | ++ | - | - | - | - |
| 伊龙属 <i>Ironus</i> | OP | 4 | + | - | - | + | - | - | + |
| <i>Cobbonchus</i> | OP | 4 | + | - | - | - | - | - | - |
| <i>Discolaimoides</i> | OP | 5 | + | ++ | ++ | + | - | ++ | + |
| 锐咽属 <i>Carcharolaimus</i> | OP | 5 | ++ | ++ | - | ++ | + | - | - |
| <i>Dominicactinolaimus</i> | OP | 5 | + | - | ++ | - | - | - | ++ |
| 狭咽属 <i>Discolaimium</i> | OP | 5 | - | - | - | - | ++ | - | - |
| 盘咽属 <i>Discolaimus</i> | OP | 5 | - | - | - | + | ++ | - | - |
| <i>Solididens</i> | OP | 5 | - | - | - | - | ++ | + | + |
| 穿咽属 <i>Nygolaimus</i> | OP | 5 | - | - | - | - | - | - | ++ |
| <i>Aquatides</i> | OP | 5 | ++ | + | - | - | - | - | - |
| 拟角咽属 <i>Paractinolaimus</i> | OP | 5 | - | - | - | - | - | ++ | - |
| <i>Paravulvus</i> | OP | 5 | - | - | + | - | - | - | - |
| <i>Clavicaudoides</i> | OP | 5 | + | - | - | - | - | - | - |
| <i>Laevides</i> | OP | 5 | + | - | - | - | - | - | - |
| 小穿咽属 <i>Nygolaimellus</i> | OP | 4 | - | - | - | - | ++ | - | + |
| 针属 <i>Paratylenchus</i> | PP | 2 | - | ++ | - | + | ++ | +++ | ++ |
| 散香属 <i>Boleodorus</i> | PP | 2 | + | - | ++ | + | - | ++ | + |
| <i>Trophotylenchulus</i> | PP | 2 | - | + | ++ | - | - | + | + |
| 茎属 <i>Ditylenchus</i> | PP | 2 | - | - | - | ++ | + | + | - |
| <i>Laimaphelenchus</i> | PP | 2 | + | + | + | + | + | + | + |
| <i>Aglenchus</i> | PP | 2 | + | - | ++ | - | + | - | - |
| <i>Bursaphelenchus</i> | PP | 2 | - | + | - | + | + | - | - |
| <i>Scutylenchus</i> | PP | 2 | - | - | - | - | - | - | ++ |
| <i>Gracilacus</i> | PP | 2 | - | + | - | - | + | - | + |
| <i>Lelenchus</i> | PP | 2 | - | - | - | - | - | + | - |
| <i>Neopsilenchus</i> | PP | 2 | - | - | - | - | + | - | - |
| 垫刃属 <i>Tylenchus</i> | PP | 2 | - | - | - | - | + | - | + |
| <i>Sakia</i> | PP | 2 | + | - | - | - | - | - | - |
| 螺旋属 <i>Helicotylenchus</i> | PP | 3 | - | - | ++ | - | ++ | ++ | ++ |

续表

| 属 Genus | 营养类型* Putative feeding | c-p 值** c-p Class | 优势度 Dominance | | | | | | |
|------------------------------|---------------------------|----------------------|---------------|----|----|----|-----|-----|----|
| | | | 6C | 6N | 9C | 9N | 12C | 12N | CK |
| <i>Sauertylechus</i> | PP | 3 | + | + | - | - | - | + | ++ |
| <i>Geocenamus</i> | PP | 3 | - | - | ++ | - | - | - | - |
| <i>Rotylechulus</i> | PP | 3 | - | - | - | - | + | + | - |
| <i>Pararotylechulus</i> | PP | 3 | - | - | + | - | - | + | - |
| 鞘属 <i>Hemicycliophora</i> | PP | 3 | - | - | - | - | + | + | - |
| 刺属 <i>Belonolaimus</i> | PP | 3 | - | - | + | - | - | - | - |
| <i>Neodolichorhynchus</i> | PP | 3 | - | - | + | - | - | - | + |
| <i>Nothocriconemoides</i> | PP | 3 | + | - | - | - | + | - | - |
| <i>Amplimerlinius</i> | PP | 3 | - | - | - | - | - | - | + |
| <i>Nacobbus</i> | PP | 3 | - | - | - | - | - | + | - |
| 半轮属 <i>Hemicriconemoides</i> | PP | 3 | - | - | - | - | - | + | - |
| <i>Trophurus</i> | PP | 3 | - | + | - | - | + | - | - |
| <i>Paratrophurus</i> | PP | 3 | - | + | - | - | - | - | - |
| <i>Cactodera</i> | PP | 3 | - | - | - | - | + | - | - |
| <i>Nagelus</i> | PP | 3 | + | - | - | - | - | - | - |
| 短体长针属 <i>Longidorella</i> | PP | 4 | + | ++ | ++ | + | - | + | - |
| 毛刺属 <i>Trichodorus</i> | PP | 4 | - | - | - | + | + | - | - |
| 长针属 <i>Longidorus</i> | PP | 5 | + | - | + | ++ | + | - | + |
| 剑属 <i>Xiphinema</i> | PP | 5 | + | - | + | - | + | - | - |
| <i>Dactyluraxonchium</i> | PP | 5 | + | - | - | - | - | - | + |
| 牙咽属 <i>Dorylaimellus</i> | PP | 5 | - | - | - | - | - | - | + |
| 缢咽属 <i>Axonchium</i> | PP | 5 | - | - | + | - | - | - | - |

由于部分线虫属名未查询到有中文命名,因此表格中只有拉丁文; * 线虫营养类型参考 Yeates 等^[33]; ** c-p: 线虫生活史策略 colonizer persister, 分类参考 Neher 等^[34]; Ba: 食细菌线虫, Bacterivores; Fu: 食真菌线虫, Fungivores; OP: 杂食/捕食性线虫, Omnivores-predators; PP: 植食性线虫, Herbivores; +++; 个体数量占总体数量 10% 以上的类群, The group with more than 10% of the total number of individuals; ++: 个体数量占总体数量 1%—10% 的类群, The group with individual number of 1%—10%; +: 个体数量占总体数量 1% 以下的类群, The group with less than 1% of the total number of individuals; -: 未出现的类群, The group that do not appear

对不同处理以及不同季节的土壤线虫属数量进行方差分析表明(表 4), 不同处理间线虫属数量差异不显著($P>0.05$), 12C 线虫属数量最多, 为(27.9±16.6) 属; 而不同季节土壤线虫属数量差异显著($P<0.05$), 其中秋季最多, 为(34.2±5.8) 属, 说明土壤线虫的季节分布差异较大。

所有分离得到的线虫生活史策略 colonizer persister(c-p) 以 c-p 4 类群为主, 占总数的 44.33%, c-p 1 类群占比最低, 为 12.07%。从图 3 可以看出, 采用目标树经营的处理各类群所占比例差异较大, 均是 c-p 4 类群所占比重较大, 其中 9N 的 c-p 4 与 c-p 5 之和所占比例最高; 而未采用目标树经营(CK) 的各类群所占比例差异较小, 各类群分布较均匀, 表明目标树经营提高了 c-p 4 和 c-p 5 的比例。

2.3 目标树经营对土壤线虫密度和不同营养类型线虫数量的影响

采用目标树经营对土壤线虫的密度影响较大(表 4、图 4), CK 的线虫密度低于 3 种处理下目标树单株区域, 且低于 3 种处理的整体样地线虫密度。其中 9C 线虫密度最大, 为(1829.3±875.2) 条/100 g 干土; CK 线虫密度最小, 为(1075.3±525.4) 条/100 g 干土; 9C 与 CK 的线虫密度呈显著差异($P<0.05$)。图 4 所示, CK 的线虫密度在不同季节以及不同土层均低于采用目标树经营的样地和目标树单株。在采用目标树经营的 3 个处理中, 保留 9 株和 12 株的处理中, 呈现出 C 线虫密度大于 N, 而保留 6 株的处理中表现出 C 小于 N。在各处理间总体上目标树保留 9 株的线虫密度最大。不同季节线虫密度差异显著($P<0.05$), 其中春季线虫密度最大, 为(2598.6±591.3) 条/100 g 干土; 冬季土壤线虫密度最低, 为(582.1±119.4) 条/100 g 干土。土壤线虫在不同土层中的个体密度排序为: 凋落层>0—10 cm>10—20 cm(图 4)。

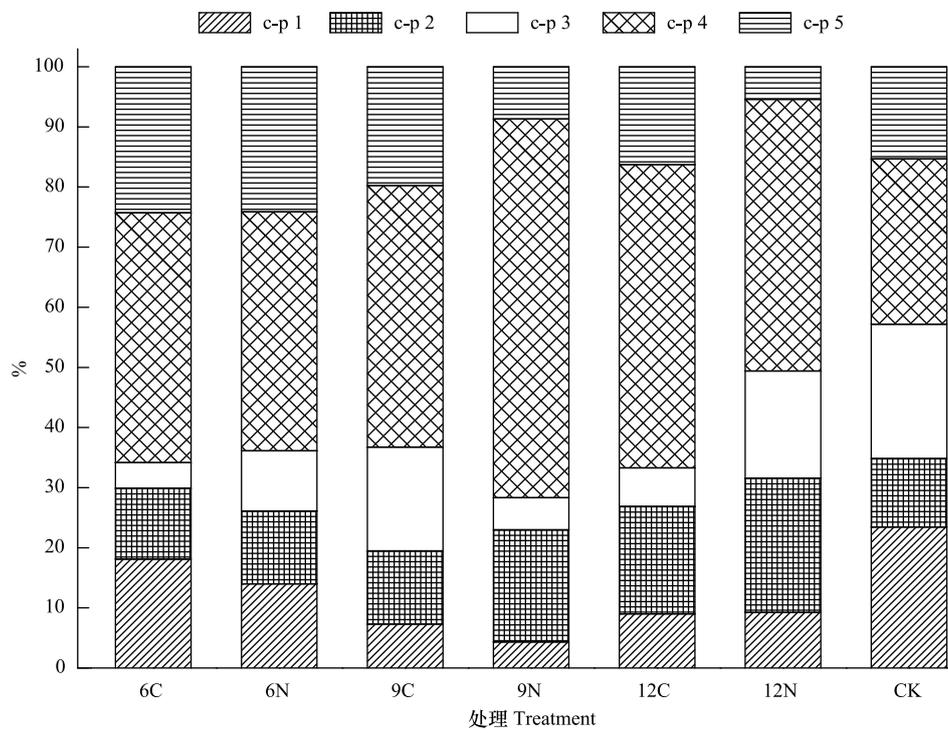


图3 不同处理土壤线虫 c-p 组成比例

Fig.3 Different treatments of soil nematode c-p composition ratio

c-p 1:线虫生活史策略为 1,colonizer persister 1;c-p 2:线虫生活史策略为 2,colonizer persister 2;c-p 3:线虫生活史策略为 3,colonizer persister 3;c-p 4:线虫生活史策略为 4,colonizer persister 4;c-p 5:线虫生活史策略为 5,colonizer persister 5

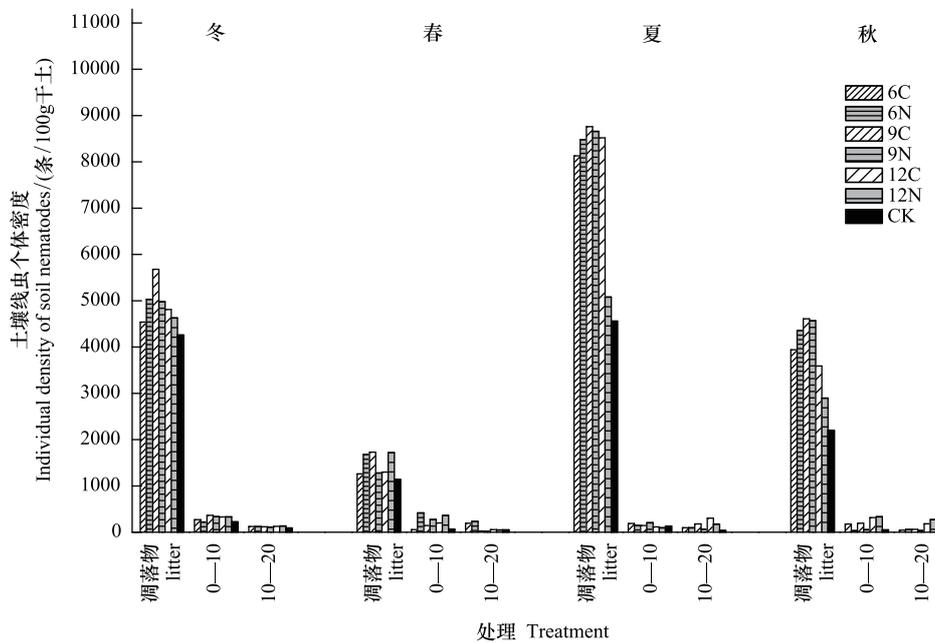


图4 土壤线虫个体密度的季节变化和垂直分布

Fig.4 Seasonal variation and vertical distribution of individual density of soil nematodes

所有分离得到的土壤线虫按不同营养类型划分,其数量依次为:杂食/捕食性线虫>食细菌性线虫>植食性线虫>食真菌性线虫(表4)。其中采用目标树经营的处理中均为杂食/捕食性线虫数量最多,食细菌性线虫

其次,而 CK 为食细菌性线虫数量最多,杂食/捕食性线虫数量其次(图 5);CK 的食细菌性线虫数量显著高于其它处理($P<0.05$),而 CK 的杂食/捕食性线虫数量均低于目标树经营的各处理,其中 6C 和 9C 显著高于 CK ($P<0.05$),表明目标树经营增加了杂食/捕食性线虫数量。不同季节均表现为杂食/捕食性线虫数量最多,冬、春、秋为食细菌性线虫数量其次,而夏季为植食性线虫数量其次。在各季节中春季的杂食/捕食性线虫数量最多,为(115.6±31.1)条;冬季的植食性线虫数量最少,为(5.1±6.3)条。植食性线虫在各季节的数量分布与植物生长状况的变化趋势一致。

表 4 不同处理以及不同季节各营养类型土壤线虫数量

Table 4 Number of each feeding type of nematodes in different treatments and different seasons

| 处理 Treatment | 属数 Genera | 食细菌性线虫 Bacterivores | 食真菌性线虫 Fungivores | 植食性线虫 Plant parasite | 杂食/捕食性线虫 Omnivores/ Predators | 线虫密度 Nematode density/ (条/100 g 干土) |
|--------------|--------------|------------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------------------|---|
| 6C | 19.0±11.2a | 47.8±22.7ab | 16.9±14.8bc | 8.0±6.3a | 109.6±20.0b | 1609.0±890.5ab |
| 6N | 22.8±10.4a | 65.3±27.1bc | 21.0±16.8c | 15.3±14.2ab | 96.7±51.3ab | 1704.8±800.0ab |
| 9C | 25.2±11.2a | 46.8±6.7ab | 8.3±8.4ab | 35.6±21.7bc | 111.6±14.7b | 1829.3±875.2b |
| 9N | 22.3±9.1a | 30.6±10.1a | 26.4±18.9c | 15.6±7.9ab | 104.9±40.7ab | 1713.3±922.3ab |
| 12C | 27.9±16.6a | 42.5±34.9ab | 28.7±12.0c | 30.4±25.6abc | 98.9±37.6ab | 1668.3±957.3ab |
| 12N | 24.8±12.4a | 64.4±17.3bc | 23.7±15.7c | 51.2±46.2c | 92.8±33.1ab | 1332.6±459.2ab |
| CK | 19.2±7.7a | 75.3±41.4d | 2.8±3.1a | 34.3±31.8bc | 73.6±36.0a | 1075.3±525.4a |
| 季节 Season | | | | | | |
| 冬 Winter | 10.0±3.2a | 54.9±39.0a | 19.2±21.3ab | 5.1±6.3a | 93.8±46.7b | 582.1±119.4a |
| 春 Spring | 17.7±5.0b | 51.0±21.5a | 23.2±15.1b | 13.8±16.2a | 115.6±31.1c | 2598.6±591.3d |
| 夏 Summer | 30.1±9.4c | 47.9±28.7a | 10.9±13.9a | 48.1±32.5b | 73.4±25.2a | 1323.8±288.4b |
| 秋 Autumn | 34.2±5.8d | 59.1±23.1a | 19.8±10.1ab | 41.8±24.0b | 110.4±21.4bc | 1742.6±150.2c |

平均值±标准差;同列数据后字母不同表示差异显著($P<0.05$, Duncan)

2.4 目标树经营对土壤线虫群落结构的影响

不同处理土壤线虫群落生态学指数如表 5 所示,采用目标树经营样地的多样性指数(H')高于 CK,但其差异不显著($P>0.05$)。均匀度指数(J)6N 显著高于 9N、12N 和 CK($P<0.05$)。优势度指数(λ)9C 最高,为 0.143±0.151。总丰富度指数(D)9N 最高,显著高于 12N($P<0.05$);9N 高于 6N 和 CK 但不显著($P>0.05$)。线虫营养多样性指数(TD)6C 低于 CK,其余均高于 CK,其中 12N 显著高于 CK($P<0.05$)。线虫成熟度指数(MI)采用目标树经营样地均高于 CK,其中 12N 与 CK 差异性不显著($P>0.05$),其余处理与 CK 差异均显著

表 5 不同处理土壤线虫群落生态学指数(N=12)

Table 5 Different treatments of soil nematode community ecological index(N=12)

| 处理 Treatment | 多样性指数 Shannon- wiener index | 均匀度指数 Pielou evenness index | 优势度指数 Simpson index | 总丰富度指数 Margalef's richness | 线虫营养 多样性指数 Trophic diversity | 线虫成熟度指数 Maturity index | 线虫通路比值 Nematoda channel ratio |
|-----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------|----------------------------------|------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|
| 6C | 2.548±0.647a | 0.883±0.044ab | 0.125±0.081ab | 28.204±1.244b | 2.126±0.610a | 3.441±0.293bc | 0.792±0.164b |
| 6N | 2.830±0.413a | 0.917±0.046b | 0.075±0.026a | 27.293±1.830ab | 2.657±0.568ab | 3.465±0.336bc | 0.766±0.148b |
| 9C | 2.658±0.846a | 0.861±0.076a | 0.143±0.151b | 27.566±0.700ab | 2.488±0.536ab | 3.541±0.178c | 0.861±0.146bc |
| 9N | 2.556±0.229a | 0.837±0.066a | 0.114±0.025ab | 28.238±1.329b | 2.366±0.498ab | 3.516±0.332c | 0.581±0.213a |
| 12C | 2.728±0.599a | 0.871±0.041a | 0.104±0.062ab | 27.535±1.686ab | 2.507±0.672ab | 3.462±0.347bc | 0.497±0.342a |
| 12N | 2.633±0.491a | 0.867±0.048a | 0.097±0.031ab | 26.548±0.825a | 2.871±0.666b | 3.161±0.425ab | 0.783±0.145b |
| CK | 2.546±0.361a | 0.839±0.036a | 0.109±0.037ab | 28.162±1.554b | 2.241±0.504a | 3.022±0.554a | 0.971±0.044c |

各线虫指数值=平均值±标准差;同列数据后字母不同表示差异显著($P<0.05$, Duncan)

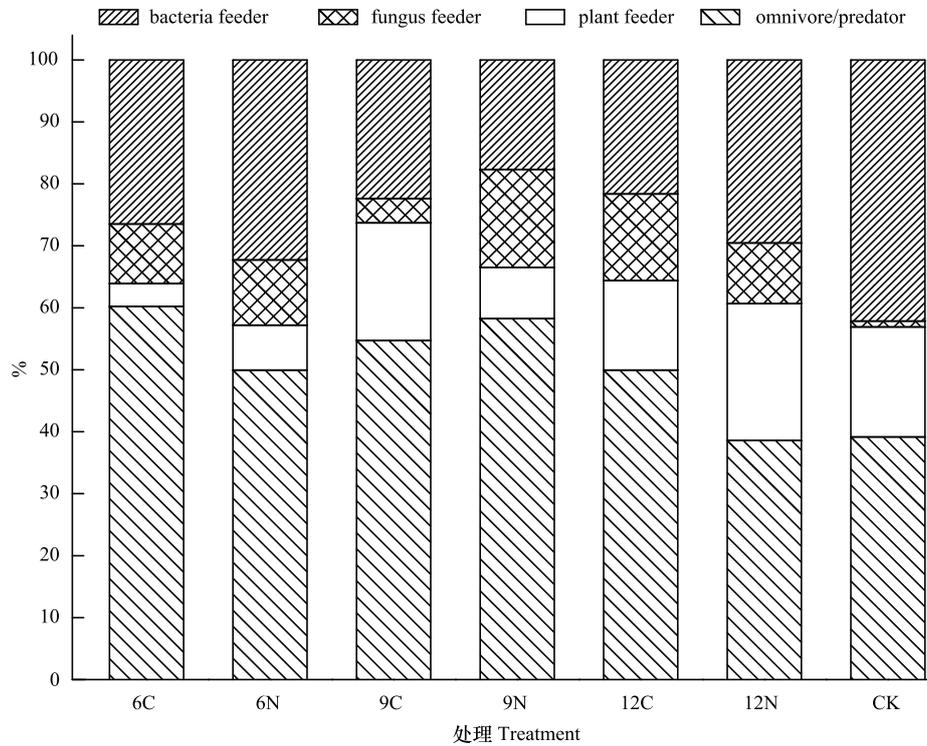


图 5 不同处理各营养类型线虫数量比例

Fig.5 The proportion of nematode populations of each feeding types in different treatments

($P < 0.05$); 目标树密度为 9 株的 MI 均高于目标树密度为 6 株和 12 株, 且显著大于 CK ($P < 0.05$)。线虫通路比值(NCR)采用目标树经营样地均于 CK 差异性显著 ($P < 0.05$), 但均大于 0.5, 表明土壤的分解过程均以细菌为主导的能量通道。

不同季节土壤线虫群落生态学指数如表 6, 多样性指数(H')夏秋两季与冬春两季差异显著 ($P < 0.05$), 其中秋季最高 3.068 ± 0.267 , 冬季最低 1.885 ± 0.360 。优势度指数(λ)冬季显著高于春、夏、秋季 ($P < 0.05$)。总丰富度指数(D)冬、夏季显著高于春、秋季 ($P < 0.05$)。线虫营养多样性指数(TD)秋季最大 2.863 ± 0.357 , 且显著高于冬、春季 ($P < 0.05$)。线虫成熟度指数(MI)春、夏、秋显著高于冬季 ($P < 0.05$), 且春季最高。线虫通路比值(NCR)均大于 0.5, 夏季且显著大于春季 ($P < 0.05$)。

表 6 不同季节土壤线虫群落生态学指数 ($N=21$)Table 6 Soil nematode community ecological index in different seasons ($N=21$)

| 季节 Season | 多样性指数 Shannon-Wiener index | 均匀度指数 Pielou evenness index | 优势度指数 Simpson index | 总丰富度指数 Margalef's richness | 线虫营养 多样性指数 Trophic diversity | 线虫成熟度指数 Maturity index | 线虫通路比值 Nematoda channel ratio |
|--------------|----------------------------------|-----------------------------------|------------------------|-------------------------------|------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|
| 冬 Winter | $1.885 \pm 0.360a$ | $0.865 \pm 0.074ab$ | $0.202 \pm 0.092b$ | $28.344 \pm 1.647b$ | $2.033 \pm 0.712a$ | $3.168 \pm 0.608a$ | $0.733 \pm 0.368ab$ |
| 春 Spring | $2.651 \pm 0.229b$ | $0.900 \pm 0.035c$ | $0.091 \pm 0.018a$ | $27.261 \pm 0.703a$ | $2.342 \pm 0.485ab$ | $3.479 \pm 0.311b$ | $0.678 \pm 0.244a$ |
| 夏 Summer | $2.955 \pm 0.212c$ | $0.836 \pm 0.050a$ | $0.080 \pm 0.024a$ | $28.387 \pm 1.647b$ | $2.622 \pm 0.514bc$ | $3.414 \pm 0.301b$ | $0.851 \pm 0.112b$ |
| 秋 Autumn | $3.068 \pm 0.267c$ | $0.871 \pm 0.046bc$ | $0.065 \pm 0.016a$ | $26.606 \pm 0.518a$ | $2.863 \pm 0.357c$ | $3.428 \pm 0.217b$ | $0.738 \pm 0.101ab$ |

各线虫指数值=平均值±标准差; 同列数据后字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$, Duncan)

2.5 土壤线虫群落与环境因子之间的关系

对不同处理的土壤线虫群落结构指标与环境因子进行 RDA 排序 (图 6), 第一轴和第二轴特征值分别为 0.417 和 0.205, 且土壤线虫群落结构和环境的相关性分别达到 0.627 和 0.936, 且结果均达到显著水平 ($P < 0.05$)。

05)。环境因子和线虫群落生态学指数主要与第一轴相关,总丰富度指数和线虫成熟度指数与线虫属的数量和杂食/捕食性线虫数量正相关,多样性指数和线虫营养多样性指数与土壤含水量和土壤 pH 相关。在各处理中,12N 与 CK 之间差异较小,而其它处理与 CK 差异较明显。

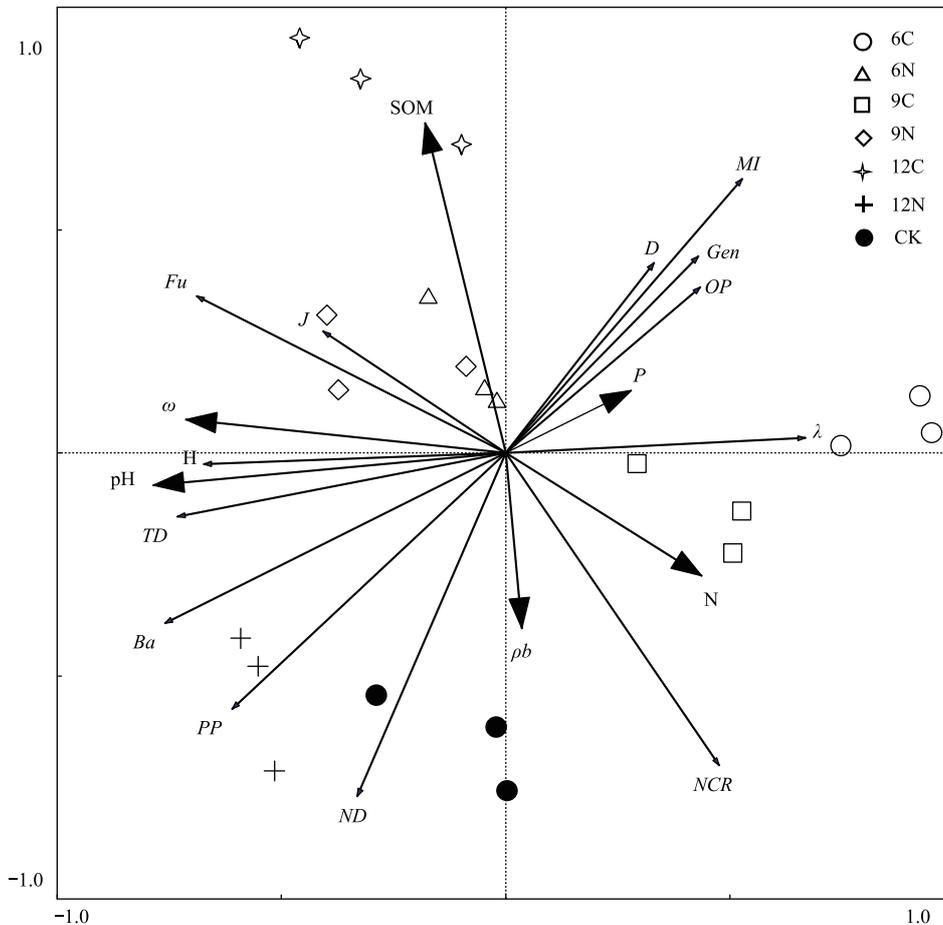


图 6 土壤线虫群落结构与环境指标的冗余分析 (RDA)

Fig.6 Redundancy analysis of soil nematode community structure and environmental indicators (RDA)

P: 土壤全磷含量, Total phosphorus; N: 土壤全氮含量, Total nitrogen; SOM: 土壤有机质含量, Soil organic matter; ρ_b : 土壤容重, Soil bulk density; ω : 土壤含水量, Soil water content; pH: 土壤 pH 值。Gen: 属数, Number of genus; ND: 线虫总数, Total number of nematodes; H: 多样性指数, Shannon-Wiener index; J: 均匀度指数, Pielou evenness index; λ : 优势度指数, Simpson index; D: 总丰富度指数, Margalef's richness; TD: 线虫营养多样性指数, Trophic Diversity; MI: 线虫成熟度指数, Maturity index; NCR: 线虫通路比值, Nematoda Channel Ratio

3 讨论

川中丘陵区柏木人工林存在林分密度大、柏木生长空间不足、生态功能退化等问题^[35-37], 采用目标树经营后, 林分密度得到不同程度的降低, 特别是目标树单株生长空间得以释放, 光照、水分等得以补充, 柏木生长环境得到改善^[5, 38-39]。本研究结果表明采用目标树经营明显增加了土壤有机质含量, 且改善了土壤 pH, 这可能与林分密度下降, 林分结构改善有关。目标树单株周围的土壤有机质积累均高于整个样地, 主要是由于目标树获得更大的生长空间, 林地地表光照增加, 使土壤温度升高, 为微生物分解有机质提供了一个更加适宜的环境^[40]。目标树单株土壤含水量低于整个样地, 且低于 CK, 可能是由于林冠空隙的增大, 林地蒸发量增加造成的^[41]。从各处理的土壤线虫群落与环境因子的相关性来看, 目标树经营使各处理样地与 CK 差异明显。

目标树经营改变了林分环境, 也影响土壤线虫数量和组成。采用目标树经营增加了线虫属数量和线虫密度, 其中线虫密度在 9C 达到最大, 9N 次之, 而 CK 最小, 表明采用目标树经营有助于促进土壤线虫数量的增

加,特别是目标树密度为 9 株/667 m²,增加效果最为明显。本研究发现土壤线虫的属数量和个体密度在各季节差异显著,且不同季节的土壤线虫科属差异也较大,这与线虫的生活周期较短有关,因此在研究土壤线虫群落时,应对每个季节的土壤线虫群落进行研究,才能体现此生境的土壤线虫群落特征;本研究的各处理之间土壤线虫属的数量差异不显著,这可能是由于仍处于目标树经营初期,其差异较小造成的。采用目标树经营的线虫生活史策略以 c-p 4 和 c-p 5 为主,占总数的 54.6%,其中 9N 的 c-p 4 和 c-p 5 占比较 CK 提升了 28.96%,而 CK 的线虫生活史策略 c-p 1 和 c-p 2 所占比重较高。c-p 值是按照线虫属于 K-对策到 r-对策分别赋予的^[34],表明采用目标树经营改善了线虫的生存环境,线虫类群由机会主义转变为保守主义,环境趋向于稳定状态^[17, 42]。

目标树经营也对土壤线虫优势类群产生了影响。采用目标树经营的处理中均为杂食/捕食性线虫数量最多,其中 9C 均高于其它处理,而 CK 为食细菌性线虫数量最多。杂食/捕食性线虫是决定食物网复杂性的关键功能类群^[26, 43],焦向丽等对东北原始林和次生林中土壤线虫调查发现,原始林中杂食/捕食性较多,而次生林中食细菌性线虫较多^[27],主要是由于原始林中生态系统完整,物种多样性高,为杂食/捕食性的生存提供更好的环境,因此杂食/捕食性线虫较多。本研究对柏木人工林采用目标树经营后,杂食/捕食性线虫数量增加,表明土壤线虫食物网拥有了更多的营养层次,土壤动物数量和多样性增多,土壤食物网更稳定,林内环境得到改善。

采用目标树经营的样地多样性指数(H')、均匀度指数(J)、线虫营养多样性指数(TD)、线虫成熟度指数(MI)均高于 CK;线虫通路比值(NCR)表明在各处理样地土壤的分解过程均以细菌为主导,而 CK 更趋向于细菌控制。多样性指数(H')、线虫成熟度指数(MI)和线虫营养多样性指数(TD)比起种群个体数量或个体营养类群而言,能更好地诠释线虫群落,更好的评价环境对土壤线虫群落的影响^[44-48]。从本研究的土壤线虫生态学指数来看,采用目标树经营优化了土壤线虫群落结构,提高了土壤线虫多样性,且目标树密度为 9 株/667 m²的样地最为显著。

4 结论

目标树经营改善了林分生长环境,特别是目标树单株生长空间得以释放,有机质得以积累。目标树经营也增加了土壤线虫的数量,9C 的线虫密度达到最大;目标树经营改善了线虫的生存环境,线虫类群由机会主义转变为保守主义,环境趋向于稳定状态;采用目标树经营的处理中均以杂食/捕食性线虫数量最多,其中 9C 的杂食/捕食性线虫数量均高于其它处理,而 CK 则是食细菌性线虫数量最多;采用目标树经营提高了多样性指数(H')、均匀度指数(J)、线虫营养多样性指数(TD)、线虫成熟度指数(MI),增加了土壤线虫群落多样性,其中目标树密度为 9 株/667 m²样地线虫成熟度指数(MI)和总丰富度指数(D)最高。因此,从采用目标树经营对土壤线虫群落的影响角度来看,目标树密度为 9 株/667 m²对土壤线虫群落和柏木人工林生态系统的优化最为有利。

参考文献 (References):

- [1] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, Solomon A M, Trexler M C, Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, 263(5144): 185-190.
- [2] 游彩虹. 基于国有林场森林可持续经营下的森林资源保护对策. *北京农业*, 2014, (6): 61-61.
- [3] 陆元昌, Werner Schindele, 刘宪钊, 包源, 雷相东, 栾慎强, 孟京辉. 多功能目标下的近自然森林经营作业法研究. *西南林业大学学报 (自然科学)*, 2011, 31(4): 1-6.
- [4] Larsen J B, Nielsen A B. Nature-based forest management—Where are we going?: Elaborating forest development types in and with practice. *Forest Ecology and Management*, 2007, 238(1/3): 107-117.
- [5] 王懿祥, 张守攻, 陆元昌, 孟京辉, 曾冀. 干扰树间伐对马尾松人工林目标树生长的初期效应. *林业科学*, 2014, 50(10): 67-73.
- [6] 李春昶, 田健夫. 国家储备林建设 PPP 模式引发的思考. *林产工业*, 2016, 43(10): 3-6.
- [7] Noble J C, Whitford W G, Kaliszewski M. Soil and litter microarthropod populations from two contrasting ecosystems in semi-arid eastern Australia. *Journal of Arid Environments*, 1996, 32(3): 329-346.

- [8] 陈小云, 刘满强, 胡锋, 毛小芳, 李辉信. 根际微型土壤动物——原生动物和线虫的生态功能. *生态学报*, 2007, 27(8): 3132-3143.
- [9] Ferris H. Form and function: metabolic footprints of nematodes in the soil food web. *European Journal of Soil Biology*, 2010, 46(2): 97-104.
- [10] 尹文英. 土壤动物学研究的回顾与展望. *生物学通报*, 2001, 36(8): 1-3.
- [11] Reichle D E. The role of soil invertebrates in nutrient cycling. *Ecological Bulletins*, 1977, 25: 145-156.
- [12] 林英华, 张夫道, 张俊清, 欧阳学军, 莫定生, 周国逸. 鼎湖山不同自然植被土壤动物群落结构时空变化. *生态学报*, 2005, 25(10): 2616-2622.
- [13] Goralczyk K. Nematodes in a coastal dune succession: indicators of soil properties?. *Applied Soil Ecology*, 1998, 9(1/3): 465-469.
- [14] 薛会英, 罗大庆, 胡锋, 李辉信, 王景升, 屈兴乐, 王鸿源, 于宝政, 孙巧. 短期围封对西藏北部高寒草甸土壤线虫群落的影响. *生态学报*, 2016, 36(19): 6139-6148.
- [15] Bongers T, Ferris H. Nematode community structure as a bioindicator in environmental monitoring. *Trends in Ecology & Evolution*, 1999, 14(6): 224-228.
- [16] Zhao J, Neher D A. Soil nematode genera that predict specific types of disturbance. *Applied Soil Ecology*, 2013, 64: 135-141.
- [17] Yeates G W. Nematodes as soil indicators: functional and biodiversity aspects. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, 37(4): 199-210.
- [18] 牟文雅, 贾艺凡, 陈小云, 刘满强, 周可新, 李俊生, 陈法军. 玉米秸秆还田对土壤线虫数量动态与群落结构的影响. *生态学报*, 2017, 37(3): 877-886.
- [19] 宋敏, 刘银占, 井水水. 土壤线虫对气候变化的响应研究进展. *生态学报*, 2015, 35(20): 6857-6867.
- [20] 佟富春, 肖以华. 广州长岗山森林土壤线虫的群落结构特征. *林业科学*, 2014, 50(2): 111-120.
- [21] 湛亚, 杨万勤, 吴福忠, 杨帆, 蓝丽英, 刘育伟, 郭彩虹, 谭波. 川西亚高山/高山森林土壤线虫多样性. *应用生态学报*, 2017, 28(10): 3360-3368.
- [22] 朱婷婷, 李伟, 刘成刚, 潘开文. 四川盆地麻竹、巨桉人工林对土壤线虫群落结构的影响. *生态学杂志*, 2014, 33(4): 1034-1041.
- [23] 张伟东, 尚艳芳, 王雪峰. 土壤线虫群落对大连石门山森林植被恢复的响应. *生态学报*, 2010, 30(4): 878-886.
- [24] 洪毅. 庄河口不同植物群落的土壤线虫特征[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2015.
- [25] 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.
- [26] 王群, 李萌, 刘世荣, 吴鹏飞. 人工林不同营造模式对土壤线虫群落的影响. *生态学杂志*, 2015, 34(12): 3443-3452.
- [27] 焦向丽, 朱教君, 张金鑫, 闫巧玲, 杨凯. 干扰对东北次生林生态系统土壤线虫群落的影响. *生态学杂志*, 2008, 27(12): 2129-2135.
- [28] 曾凡明. 四川省划定国家储备林 90 万亩. [2014-09-05]. <http://finance.china.com.cn/roll/20140905/2659243.shtml>.
- [29] 陆元昌. 近自然森林经营的理论与实践. 北京: 科学出版社, 2006.
- [30] 尹海锋, 苏宇, 郭茂金, 刘思泽, 刘晟男, 陈宏基, 何朋俊, 张小国, 李贤伟, 范川, 李相君, 张伟. 土壤样品分层采集器: 中国, 201720567015.5. 2017-12-12.
- [31] 林大仪. 土壤学实验指导. 北京: 中国林业出版社, 2004.
- [32] 尹海锋, 苏宇, 郭茂金, 刘晟男, 张小国, 陈宏基, 何朋俊, 李贤伟, 范川, 李相君. 干湿一体土壤动物分离装置: 中国, 201720240122.7. 2018-01-23.
- [33] Yeates G W, Bongers T, De Goede R G M, Freckman D W, Georgieva S S. Feeding habits in soil nematode families and genera—an outline for soil ecologists. *The Journal of Nematology*, 1993, 25(3): 315-331.
- [34] Neher D A, Peck S L, Rawlings J O, Lee Campbell C. Measures of nematode community structure and sources of variability among and within agricultural fields. *Plant and Soil*, 1995, 170(1): 167-181.
- [35] 谢雨彤, 唐骅萍, 李贤伟, 周义贵, 范川, 余波, 张伟. 低效柏木林窗改造对土壤动物多样性的影响. *应用与环境生物学报*, 2016, 22(5): 800-807.
- [36] 范川, 周义贵, 李贤伟, 张健, 廖洪流, 李凤汀, 冯茂松. 柏木低效林改造不同模式土壤抗蚀性对比. *林业科学*, 2014, 50(6): 107-114.
- [37] 苏宇, 李贤伟, 刘运科, 李金凤, 尹海峰, 王之南. 柏木低效林窗改造初期边界木细根形态和生物量变异. *西北植物学报*, 2015, 35(3): 587-593.
- [38] 王懿祥. 人工马尾松和杉木林目标树经营理论与实践[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2012.
- [39] 张晓红, 张会儒, 卢军, 雷相东. 美国目标树经营体系及其经营效果研究进展. *世界林业研究*, 2016, 29(1): 91-96.
- [40] 马芳芳, 贾翔, 赵卫, 周旺明, 周莉, 于大炮, 吴志军, 代力民. 间伐强度对辽东落叶松人工林土壤理化性质的影响. *生态学杂志*, 2017, 36(4): 971-977.
- [41] 杨育林, 李贤伟, 王海明, 刘运科, 潘业田, 张军. 抚育间伐对川中丘陵区柏木人工林生长和植物多样性的影响. *山地学报*, 2015, 33(2): 199-207.
- [42] Bongers T. The maturity index: an ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition. *Oecologia*, 1990, 83(1): 14-19.
- [43] Polis G A, Strong D R. Food web complexity and community dynamics. *The American Naturalist*, 1996, 147(5): 813-846.
- [44] Neher D A. Nematode communities as ecological indicators of agroecosystem health//Gliessman S R. *Agroecosystem Sustainability: Developing Practical Strategies*. Boca Raton: CRC Press, 2001: 105-120.
- [45] Neher D A. Role of nematodes in soil health and their use as indicators. *Journal of Nematology*, 2001, 33(4): 161-168.
- [46] 叶瑶, 高晓奇, 付梦娣, 苏荣花, 李俊生, 肖能文. 陇东黄土高原石油开采对土壤线虫群落的影响. *生态学报*, 2016, 36(4): 1141-1151.
- [47] Chen G, Qin J, Shi D Z, Zhang Y M, Ji W H. Diversity of soil nematodes in areas polluted with heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Lanzhou, China. *Environmental Management*, 2009, 44(1): 163-172.
- [48] Bongers T. The Maturity Index, the evolution of nematode life history traits, adaptive radiation and cp-scaling. *Plant and Soil*, 1999, 212(1): 13-22.