人工林不同营造模式对土壤线虫群落的影响*

王 群[1] 李 萌[1] 刘世荣[2] 吴鹏飞[1**]

([1]西南民族大学青藏高原研究院, 成都 610041; [2]中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091)

摘 要 为了研究南亚热带人工林不同营造模式对土壤线虫群落的影响,于2013年7月在中国林业科学院热带林业实验中心林场分别选取针叶林(马尾松林、杉木林)、阔叶林(米老排、红椎林)及混交林(马尾松-红椎、马尾松-大叶栎),并对6种营造模式人工林的土壤线虫及土壤理化性质进行了调查。共鉴定线虫16853条,平均密度为1873条·100 g^{-1}干土,隶属于2纲8目32科53属,其中基齿属、微咽属和金线属为优势属:PCA分析结果表明,杉木林与米老排林、马尾松-红椎混交林与红椎林的线虫群落结构相似性较高。线虫群落密度以马尾松-大叶栎混交林最大,红椎林和马尾松-红椎混交林较低,Shannon指数和均匀度指数均以马尾松林和米老排林较高,以马尾松-大叶栎混交林最低:成熟指数MI、PPI、PPI/MI指数和丰富度指数在不同经营模式间均无显著差异,而杂食-捕食性线虫、食细菌性线虫和植物寄生性线虫密度和WI指数差异显著。相关分析表明,土壤磷含量与植物寄生、食细菌、食真菌线虫显著相关,而土壤钾含量仅与杂食-捕食性线虫显著正相关。结果表明,6种经营模式对线虫组成和营养结构有明显影响,土壤磷和钾含量是影响线虫群落营养结构的主要因子。

关键词 南亚热带; 土壤线虫; 营造模式; 人工林; 群落结构

中图分类号 Q958.15 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2015)12-3443-10

Effects of different silvicultural patterns of plantation forests on soil nematode communities. WANG Qun[1], LI Meng[1], LIU Shi-rong[2], WU Peng-fei[1**] ([1]*Institute of Qinghai-Tibet Plateau, Southwest University for Nationalities, Chengdu* 610041, *China*; [2]*Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing* 100091, *China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2015, **34**(12): 3443-3452.

Abstract: Six silvicultural patterns of plantation forests, including coniferous forests (*Pinus massoniana*, *Cunninghamia lanceolata*), broadleaf forests (*Mytilaria laosensis*, *Castanopsis hystrix*) and mixed forests (*Pinus massoniana*+*Castanopsis hystrix*, *Pinus massoniana* +*Castanopsis fissa*), were selected at the Experimental Centre of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry in July 2013, and soil nematode communities and soil physico-chemical properties were investigated to reveal the effects of silvicultural patterns on the soil nematode communities. A total of 16853 individuals of nematode were extracted, belonging to 53 genera, 32 families, 8 orders and 2 phyla. The mean density of the nematodes was 1873 ind · 100 g^{-1} dry soil. The dominant genera were *Iotonchus*, *Microlaimus* and *Chrysonema*. Principal component analysis (PCA) showed that the structures of soil nematode communities were similar between the *C. lanceolata* forest and the *M. laosensis* forest, and the same pattern was observed between the *C. hystrix* forest and the mixed *P. massoniana* + *C. hystrix* forest. The densities of soil nematodes were smaller in the *C. hystrix* forest and the mixed *P. massoniana* + *C. hystrix* forest than in the other forests. The Shannon index and Pielou index of soil nematode communities in the *P. massoniana* and *M. laosensis* forests were greater than those of the other forests. The highest density and lowest Shannon

* 国家自然科学基金项目(41371270、40801092)和中央高校优秀团队及重大孵化项目(2014NZYTD01)资助。

** 通讯作者 E-mail: wupf@swun.cn

收稿日期: 2015-03-09 接受日期: 2015-07-24

index and Pielou index were found in the mixed *P. massoniana* + *C. fissa* forest. The differences in taxonomic richness, free-living nematode maturity index (MI), plant-parasitic maturity index (PPI) and PPI/MI index were not significant among these silvicultural patterns. However, predators-omnivores, bacterivores, plant parasites and Wasilewska index (WI) differed significantly among these silvicultural patterns. Correlation analysis showed that the densities of plant parasites, bacterivores and fungivores were affected significantly by soil P content, while a significant positive relationship was found between soil K content and the density of predators-omnivores. These results demonstrated that different silvicultural patterns influenced the functional structure and composition of soil nematode communities. Soil P and K were the main factors affecting the trophic structure of soil nematode communities.

Key words: southern subtropics; soil nematode; silvicultural pattern; plantation forest; community structure.

近年来,天然林面积在不断下降,同时人工林面积在逐渐增加,因此人工林在森林生态系统中的地位也在逐渐上升。据国家林业局第八次全国森林资源清查(2009—2013 年)结果,我国人工林面积达 0.69 亿 hm^2,人工林在我国林业建设中占有重要地位(谢裕红,2014)。然而,与天然林相比,人工林存在地力衰退、病虫危害严重与生物多样性低等生态问题(盛炜彤,1995)。如何科学调整人工林的经营模式,提高人工林生态系统的功能效益是当前人工林发展亟待解决的科学问题。为此,中国林业科学研究院在广西凭祥市的热带林业实验中心开展了人工林不同营造模式的改造实验。为了评估不同营造模式人工林的生态效益,研究人员对该区域不同营造模式人工林的生物量、生产力和碳储量等进行了研究(康冰等,2009;卢立华等,2009;Wang *et al.*, 2010a),但未在土壤动物多样性方面开展调查研究。

线虫是土壤中最为丰富的生物之一,是土壤中的重要生物类群,对土壤有机物的分解、养分循环、土壤肥力的保持等具有重要作用(De Goede *et al.*, 1994)。土地管理措施可影响土壤线虫群落结构(Yeates *et al.*, 1999),而土壤线虫群落结构变化也可反映土壤理化性质的变化(Neher, 2001)。因此,利用土壤线虫群落变化来评估不同管理措施对生态系统的影响已成为广泛接受的做法(Pan *et al.*, 2010;万青等,2014;朱婷婷等,2014)。本文拟通过对不同营造模式人工林土壤线虫群落的调查,研究人工林不同营造模式对土壤线虫群落组成、多样性及功能群结构的影响,旨在揭示人工林不同营造模式下土壤生态系统的环境质量和稳定性的状况,为人工林的可持续经营和管理提供理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究样地位于广西凭祥的中国林业科学研究院热带林业实验中心伏波实验场(21°57′47″N—22°19′27″N,106°39′50″E—106°59′30″E)内,该区属南亚热带季风型半湿润-湿润气候区,干湿季节明显,4—9 月为雨季,10 月至翌年 3 月为旱季。年平均气温 20.5~21.7 ℃,≥10 ℃年活动积温 6000~7600 ℃;年均降水量 1261~1388 mm,空气相对湿度 80%~84%。地貌类型以低山丘陵为主,海拔 430~680 m,地带性土壤为花岗岩发育的山地红壤,土壤厚度>80 cm,pH 值在 4.8~5.5。

选取马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、米老排(*Mytilaria laosensis*)、红椎(*Castanopsis hicklii*)、马尾松-红椎混交(*Pinus massoniana* + *Castanopsis fissa*)和马尾松-大叶栎(*Pinus massoniana*+*Castanopsis hystrix*)混交 6 种人工林为研究对象。马尾松林林冠不密闭,林下有致密的草本植物,主要以蔓生莠竹(*Microstegium ciliatum*)、铁芒箕(*Dicranopteris linearis*)为优势,盖度为 90%,枯枝落叶层为 3.5 cm 左右;杉木林冠不密闭,林下极少的灌草植物,草本盖度为 10%,枯枝落叶层为 4 cm 左右,林下物种主要有叶榕(*Ficus hispida*)、乌毛蕨(*Blechnum orientale*)等;红椎林林冠密闭,郁闭度很大,极少有直射光到达林下,林下植物稀少且分布不均,草本盖度为 10%,多以红椎幼苗为主,但落叶量很大,地表有很厚的未分解半分解的落叶层,落叶层为 7 cm 左右,主要物种有三叉苦(*Euodia lepta*)、野漆(*Toxicodendron succedaneum*)和铁芒箕等;米老排人工林枝繁茂盛,林下植物稀少,但凋落物多。植被

表 1　不同经营模式下土壤主要理化特性

Table 1　Main soil physicochemical properties under different management patterns

经营模式	土壤湿度	pH	有机质 (g·kg^{-1})	全氮 (g·kg^{-1})	全磷 (g·kg^{-1})	有效磷 (mg·kg^{-1})	全钾 (g·kg^{-1})	速效钾 (mg·kg^{-1})
PM	34.57±1.42 ab	3.72±0.04 b	70.25±6.43 a	2.28±0.16 b	0.50±0.03 a	2.16±0.56 ab	1.18±0.11 c	26.99±1.79 d
CL	40.7±1.78 a	4.22±0.04 a	45.25±2.88 b	1.80±0.05 c	0.32±0.01 b	2.03±0.23 ab	6.23±0.32 a	123.36±5.35a
ML	43.53±1.54 a	3.63±0.05 bc	75.99±6.2 a	2.77±0.13 a	0.31±0.01 b	3.28±0.62a	1.98±0.22 b	56.17±2.19 b
CH	19.9±1.38 c	3.75±0.03 b	47.16±1.08 b	1.79±0.03 c	0.30±0.01 b	0.75±0.27b	1.70±0.29 bc	40.21±3.51 c
PF	28.5±1.93 b	3.55±0.02 c	63.28±3.53 ab	2.03±0.12 bc	0.32±0.01 b	0.63±0.44b	1.05±0.00 c	20.93±2.49 d
PH	35.3±1.68 ab	3.61±0.02 bc	49.86±5.29 b	2.16±0.06 bc	0.36±0.01 ab	3.32±0.24a	1.06±0 c	31.27±0.88 cd
F	27.52	24.20	7.82	13.40	27.20	7.58	24.07	94.53
P	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

N=6,同一列不同字母表示差异显著(*P*<0.05)。PM:马尾松林(*Pinus massoniana*);CL:杉木林(*Cunninghamia lanceolata*);ML:米老排林(*Mytilaria laosensis*);CH:红椎林(*Castanopsis hystrix*);PF:马尾松-红椎混交林(*Pinus massoniana*+*Castanopsis hystrix*);PH:马尾松-大叶栎混交林(*Pinus massoniana*+*Castanopsis fissa*);下同。

总盖度为 8%,枯枝落叶层在 12 cm 左右,主要物种有九节(*Psychotria rubra*)和铁芒箕等;马尾松-红椎混交林和马尾松-大叶栎混交林草本盖度分别为 70%和 60%,枯枝落叶层均在 5 cm 左右,主要物种有三叉苦、玉叶金花(*Mussaenda baromet*z)、铁芒箕和金毛狗(*Cibotium baromet*z)等。

1.2　研究方法

1.2.1　样地设置

在中国林业科学研究院热带林业实验中心的伏波实验场选取了 6 种不同经营模式的人工林,具体包括:马尾松林、杉木林 2 种针叶林;米老排林、红椎林 2 种阔叶林和马尾松-红椎、马尾松-大叶栎 2 种针阔混交林,各样地土壤基本概况如表 1。每种模式选取 6 个大小约为 50 m×50 m 的样地,且不在同一块林地内。

1.2.2　样品的采集、分离及线虫分离方法　于 2013 年 7 月在中国林业科学研究院热带林业实验中心内的林区对选取的 6 种人工林样地,每个样地中各选取 6 个采样点,间距在 5 m 左右。各样地取样深度 15 cm,沿土壤剖面划分为 0~5、5~10 和 10~15 cm 3 层,共采集用于提取分离土壤线虫的土壤样品 108 份。实验室内,从各土样中称取 50 g,用湿漏斗法(Baermann 法)分离土壤线虫,分离时间为 48 h。根据《中国土壤动物检索图鉴》(尹文英等,1998)在光学显微镜(Leica DM4000B)下鉴定到属,并统计个体数量。根据土壤的含水量,将土壤线虫换算成每 100 g 干土中线虫的条数。

1.2.3　数据分析　将采集到的土壤线虫根据个体数的多少进行优势类群的划分,个体数占总捕获量 10%以上者为优势类群,个体数占总捕获量 1%~10%为常见类群,个体数占总捕获量 1%以下为稀有类群(林英华等,2004)。

根据线虫头部形态学特征和取食生境将土壤线虫分为食细菌类群(bacterivores)、食真菌类群(fungivores)、植物寄生类群(plant parasites)和杂食类群/捕食类群(omnivores-predators) 4 个功能群(Yeates *et al.*,1993;梁文举等,2001)。

采用 Shannon 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Margalef 丰富度指数研究土壤线虫群落的多样性(梁文举等,2001;Serigne *et al.*,2001)。计算公式分别如下:

Shannon 多样性指数: $H = -\sum_{i=1}^{S} P_i \ln P_i$

Pielou index 均匀度指数: $E = H/\ln S$

Margalef 丰富度指数: $D = (S-1)/\ln N$

式中,S 为类群数,N 为群落总个体数,P_i 为第 i 种类群个体数在群落总个体数中所占的比例。

用瓦斯乐斯卡指数(Wasilewska index, WI)(Wasilewska,1994)、自由生活成熟指数(free-living nematode maturity index, MI)和植物寄生成熟指数(plant-parasite index, PPI)(Bongers,1990)表达各生境土壤线虫群落功能结构特征。计算公式如下:

$$WI = (f + b)/pp,\ MI(PPI) = \sum cp_i \times v_i$$

式中,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;cp_i 为自由生活(植物寄生性)土壤线虫的第 i 类 colonizer-persister 值(Bongers,1990);n 为自由生活(植物寄生性)土壤线虫类群数;v_i 为土壤线虫群落自由生活(植物寄生性)线虫的第 i 类群个体数占群落总个体数的比例。

用主成分分析(PCA)对不同人工林土壤线虫群落进行排序,以研究人工林不同经营模式对土壤线虫群落结构的影响。排序数据为土壤动物各属的

个体数量。

采用单因素方差分析(one-way ANOVA)对人工林不同经营模式下土壤线虫群落密度及多样性指数的差异性进行检验。如果差异显著则用 Tukey HSD 法(方差齐性)和 Tamhane's T2(M)法(方差不齐)进行多重比较。对与不服从正态分布的数据,运用 lg(x+1)转换,如若转换后仍不服从正态分布则用 Kruskal-Wallis Test (H)和 Mann-Whitney 进行非参检验。

此外,采用双变量相关分析(bivariate correlation analysis)研究环境因子与土壤线虫间的关系,采用 two-tailed 检验获得相关性。

数据分析使用 CANOCO for Windows 4.5 及 IBM SPSS 20.0 软件。

2 结果与分析

2.1 不同经营模式人工林土壤线虫群落组成

本项研究共分离得到土壤线虫 16853 条,平均密度为 1873 条 · 100 g^{-1}干土,隶属于 2 纲 8 目 32 科 53 属(表 2)。从各类群的密度可知,基齿属(*Iotonchus*)、微咽属(*Microlaimus*)和金线属(*Chrysonema*)是优势属,三者占总个体数的 53.5%。常见类群包括活跃属(*Greenenema*)等 11 属,共占总体的 38.1%;稀有类群包括原杆属(*Protorhabditis*)等 39 属,仅占总个体数的 8.1%。

马尾松林共分离得到线虫 26 属 2800 条,个体密度平均 1867 条 · 100 g^{-1},其中基齿属(*Iotonchus*)、微咽属(*Microlaimus*)、金线属(*Chrysonema*)和活跃属(*Greenenema*)为优势属,4 属的个体数量占所有个体总数的 65.8%;拖布利属(*Tobrilus*)等 9 个属为常见属,占所有已知个体数的 29.5%;短矛属(*Doryllium*)等 13 属为稀有属,占所有个体数的 4.6%。

杉木林共分离得到线虫 20 属 2987 条,个体密度平均 1991 条 · 100 g^{-1},其中基齿属(*Iotonchus*)、金线属(*Chrysonema*)和唇绕线属(*Chiloplectus*)为优势属,3 属的个体数量占所有个体总数的 72.2%;三孔属(*Tripyla*)等 6 个属为常见属,占所有已知个体数的 23.3%;嘴刺属(*Enoploides*)等 11 属为稀有属,占所有个体数的 4.6%。

米老排林共分离得到线虫 21 属 3909 条,个体密度平均 2606 条 · 100 g^{-1},其中基齿属(*Iotonchus*)、金线属(*Chrysonema*)和角绕线属(*Ceratoplecyus*)为优势属,3 属的个体数量占所有个体总数的 49.8%;单齿属(*Mononchus*)等 9 个属为常见属,占所有已知个体数的 46.7%;嘴刺属(*Enoploides*)等 9 属为稀有属,占所有个体数的 3.6%。

红椎林共分离得到线虫 29 属 1286 条,个体密度平均 857 条 · 100 g^{-1},其中基齿属(*Iotonchus*)和拖布利属(*Tobrilus*)为优势属,2 属的个体数量占所有个体总数的 51.6%;色矛属(*Chromadorita*)等 14 个属为常见属,占所有已知个体数的 42.0%;锯齿属(*Prionchulus*)等 13 属为稀有属,占所有个体数的 6.4%。

马尾松-红椎混交林共分离得到线虫 21 属 1758 条,个体密度平均 838 条 · 100 g^{-1},其中基齿属(*Iotonchus*)、金线属(*Chrysonema*)和三孔属(*Tripyla*)为优势属,3 属的个体数量占所有个体总数的 66.9%;拟矛线属(*Dorylaimoides*)等 12 个属为常见属,占所有已知个体数的 30.5%;垫咽属(*Tylencholaimus*)等 6 属为稀有属,占所有个体数的 2.7%。

马尾松-大叶栎混交林共分离得到线虫 18 属 4613 条,个体密度平均 3075 条 · 100 g^{-1},其中基齿属(*Iotonchus*)和微咽属(*Microlaimus*)为优势属,2 属的个体数量占所有个体总数的 73.9%;鞘属(*Hemicycliophora*)等 8 个属为常见属占所有已知个体数的 23.9%;锯齿属(*Prionchulus*)等 8 属为稀有属,占所有个体数的 2.3%。

2.2 不同经营模式人工林土壤线虫群落营养类群

杂食-捕食性和植物寄生性的线虫密度以米老排林最高,食细菌性线虫密度以马尾松-大叶栎最高,三者均以红椎林和马尾松-红椎混交林较低(P<0.05)(图 1)。食真菌性线虫密度以马尾松林最高,在米老排林和红椎林中未发现食真菌线虫(图 1)。4 种功能群中,杂食-捕食性线虫密度占总体的 56.0%,食细菌性线虫占 40.0%,而植物寄生性线虫和食真菌性线虫分别占总体的 3.5%和 0.5%(表 2)。由此可知,杂食-捕食性和食细菌性线虫是该区域线虫群落的主要功能类群。

2.3 不同经营模式人工林土壤线虫群落结构特征

6 种经营模式下的土壤线虫群落结构存在一定的相似性和差异性(图 2)。马尾松林和马尾松-大叶栎混交林的土壤线虫群落结构均与其他经营模式下的线虫群落结构差异较大,而杉木林与米老排林、马尾松-红椎混交林与红椎林的线虫群落结构相似性较高,但这两者间的相似性较低。

表 2　土壤线虫群落组成及个体密度(条·100 g^{-1}干土)

Table 2　Taxonomic composition and individual density of soil nematode in different forests

属	功能团	PM	CL	ML	CH	PF	PH	Mean	比例(%)
基齿属 *Iotonchus*	Om4	191.33	470.00	484.67	353.33	302.00	760.67	427.00	22.80
金线属 *Chrysonema*	Om5	308.00	465.33	439.33	81.33	135.33	162.67	265.33	14.17
拖布利属 *Tobrilus*	Om4	100.67	107.33	160.67	89.33	18.00	115.33	98.56	5.26
三孔属 *Tripyla*	Om4		85.33	175.33	46.67	123.33	39.33	78.33	4.18
单齿属 *Mononchus*	Om4	31.33	54.00	105.33	42.67	32.67	3.33	44.89	2.40
异色矛属 *Achromadors*	Om3	64.00	4.00	114.00	4.67	10.67		32.89	1.76
拟矛线属 *Dorylaimoides*	Om4		99.33	41.33	4.67			24.22	1.29
嘴刺属 *Enoploides*	Om5	42.67	1.33	2.67	6.00	58.67	20.00	21.89	1.17
穿咽属 *Nygolaimus*	Om5	30.67					75.33	17.67	0.94
单棘属 *Mononchulus*	Om4	3.33			12.67	12.00	39.33	11.22	0.60
色矛属 *Chromadorita*	Om3	16.00	5.33	13.33	15.33	10.00		10.00	0.53
锯齿属 *Prionchulus*	Om4				6.00		24.00	5.00	0.27
伊龙属 *Ironus*	Om4	8.67			13.33	2.67		4.11	0.22
拟杯咽 *Paracyatholaimus*	Om3		11.33					1.89	0.10
锉齿属 *Mylonchulus*	Om4				10.00			1.67	0.09
单色矛 *Monochromadora*	Om3				6.00			1.00	0.05
毛刺属 *Trichodorus*	Om4	6.00						1.00	0.05
原色矛 *Prochromadora*	Om3	4.67						0.78	0.04
盘咽属 *Discolaimus*	Om5				3.33			0.56	0.03
小穿咽属 *Nygolaimellus*	Om5	2.67						0.44	0.02
钵盘属 *Mylodiscus*	Om4				1.33			0.22	0.01
刻点属 *Punctodora*	Om3				1.33			0.22	0.01
小计		810.00	1303.33	1536.67	698.00	705.33	1240.00	1048.89	56.01
微咽属 *Microlaimus*	Ba2	286.67	6.67	36.00	9.33	4.00	1510.67	308.89	16.50
活跃属 *Greenenema*	Ba2	442.67	81.33	250.67	12.67	22.00	200.00	168.22	8.98
唇绕线属 *Chiloplectus*	Ba2	141.33	501.33	156.00	2.67	11.33		135.44	7.23
角绕线属 *Ceratoplecyus*	Ba2			374.00				62.33	3.33
圆顶属 *Domorganus*	Ba2	90.67	11.33	20.00		1.33	0.67	20.67	1.10
原杆属 *Protorhabditis*	Ba1	6.00	14.00	14.00	47.33	25.33	2.67	18.22	0.97
短腔属 *Brevibucca*	Ba2	3.33		19.33	9.33	26.67		9.78	0.52
中杆属 *Mesorhabditis*	Ba1				36.00	7.33		7.22	0.39
无齿属 *Anonchus*	Ba2				14.00	16.00		5.00	0.27
拟鳗线属 *Anguilluloides*	Ba2	18.00						3.00	0.16
绕线属 *Plectus*	Ba2		14.67			1.33		2.67	0.14
杆咽属 *Rhabdolaimus*	Ba2				3.33	12.00		2.56	0.14
齿咽属 *Odotopharynx*	Ba3				9.33			1.56	0.08
棱咽属 *Prismatolainus*	Ba3				6.67			1.11	0.06
连胃属 *Chronogaster*	Ba2			5.33				0.89	0.05
巴氏属 *Bastiania*	Ba2			5.33				0.89	0.05
威尔疣线属 *Wilsotylus*	Ba2	3.33						0.56	0.03
柱咽属 *Cylindrolaimus*	Ba2				1.33			0.22	0.01
小计		992.00	629.33	880.67	152.00	127.33	1714.00	749.22	40.01
剑属 *Xiphinema*	H5	8.67	14.00	174.00				32.78	1.75
穿孔属 *Radopholus*	H3						62.00	10.33	0.55
短体长针属 *Longidorella*	H5	1.33	36.00	9.33	7.33			9.00	0.48
鞘属 *Hemicycliophora*	H3						39.33	6.56	0.35
长针属 *Longidoris*	H5	28.67						4.78	0.26
盘旋属 *Rotylenchus*	H3			5.33				0.89	0.05
针属 *Paratylenchus*	H2						5.33	0.89	0.05
柄瑞球属 *Paurodontus*	H2						2.67	0.44	0.02
小计		38.67	50.00	188.67	7.33	0.00	109.33	65.67	3.51
瘤咽属 *Tylencholaimellus*	Fu4	21.33	6.00					4.56	0.24
真滑刃属 *Aphelenchus*	Fu2						12.00	2.00	0.11
垫咽属 *Tylencholaimus*	Fu4					6.00		1.00	0.05
大矛属 *Enchodelun*	Fu4	4.67						0.78	0.04
短矛属 *Doryllium*	Fu4		2.67					0.44	0.02
小计		26.00	8.67	0.00	0.00	6.00	12.00	8.78	0.47
总密度		1866.67	1991.33	2606.00	857.33	838.67	3075.33	1872.56	100.00
总类群		26	20	21	29	21	18	53	

Ba:食细菌类群;Fu:食真菌类群;Om:捕食类群/杂食类群;H:植物寄生类群;功能类群所附数字为 c-p 值。

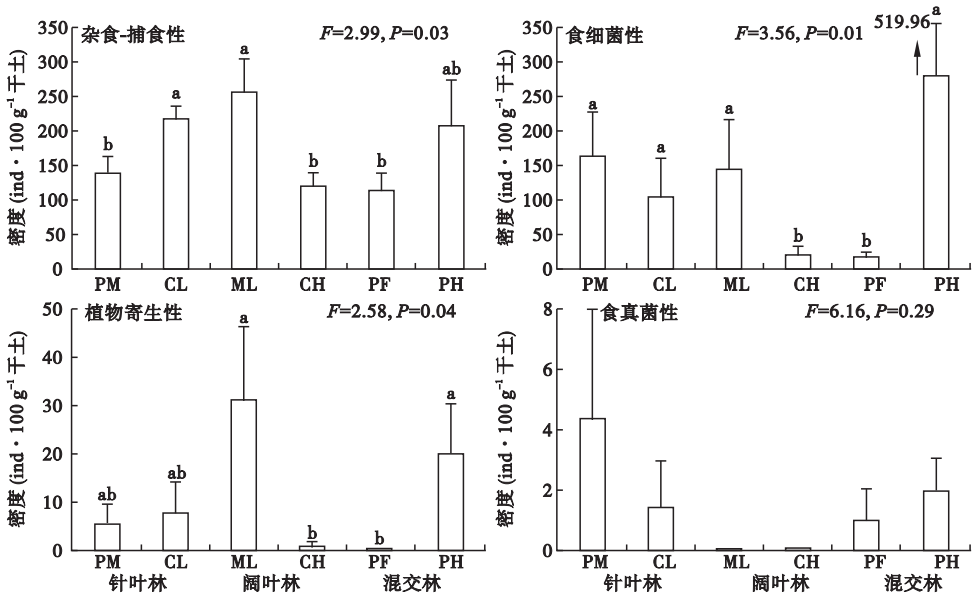


图 1 不同经营模式人工林土壤线虫群落营养类群

Fig.1 Soil nematode densities for each trophic group in plantation forests under different management patterns

数值为平均值±标准误。PM:马尾松林(*Pinus massoniana*);CL:杉木林(*Cunninghamia lanceolata*);ML:米老排林(*Mytilaria laosensis*);CH:红椎林(*Castanopsis hystrix*);PF:马尾松-红椎混交林(*Pinus massoniana+Castanopsis hystrix*);PH:马尾松-大叶栎混交林(*Pinus massoniana+Castanopsis fissa*)。

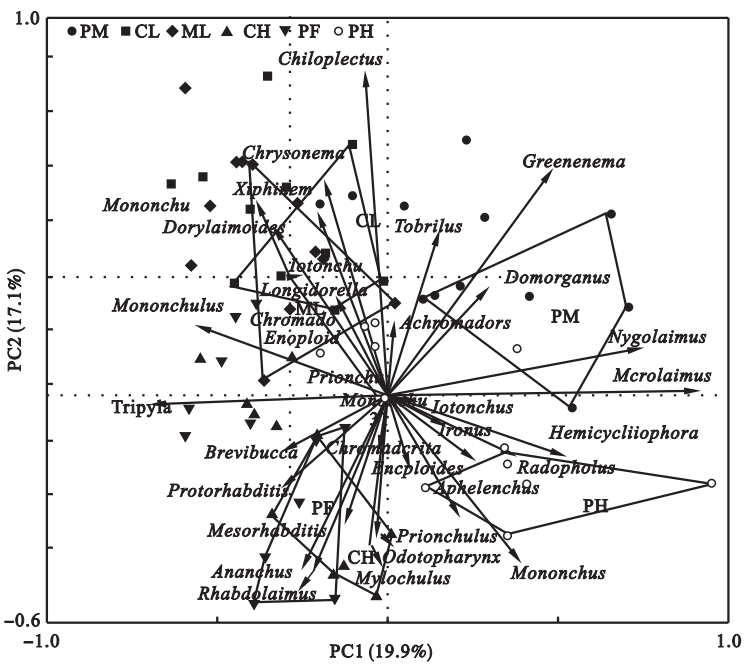


图 2 土壤线虫群落主成分分析排序图

Fig.2 Ordinations of principal components analysis on soil nematode communities

PM:马尾松林(*Pinus massoniana*);CL:杉木林(*Cunninghamia lanceolata*);ML:米老排林(*Mytilaria laosensis*);CH:红椎林(*Castanopsis hystrix*);PF:马尾松-红椎混交林(*Pinus massoniana+Castanopsis hystrix*);PH:马尾松-大叶栎混交林(*Pinus massoniana+Castanopsis fissa*)。

由图 2 还可知,第 1 排序轴主要反映微咽属(*Microlaimus*)的数量变化。马尾松和马尾松-大叶栎混交林分布在微咽属-的箭头所指方向,表明这两种经营模式下的微咽属密度较高。同理,第 2 排序轴主要反映唇绕线属(*Chiloplectus*)的数量变化;杉木林和米老排林下唇绕线属密度较高。

2.4 不同经营模式人工林土壤线虫群落多样性

土壤线虫群落多样性在不同经营模式间存在一定差异(图 3)。马尾松-大叶栎混交林的线虫密度最大,其次是米老排林,红椎林和马尾松-红椎混交

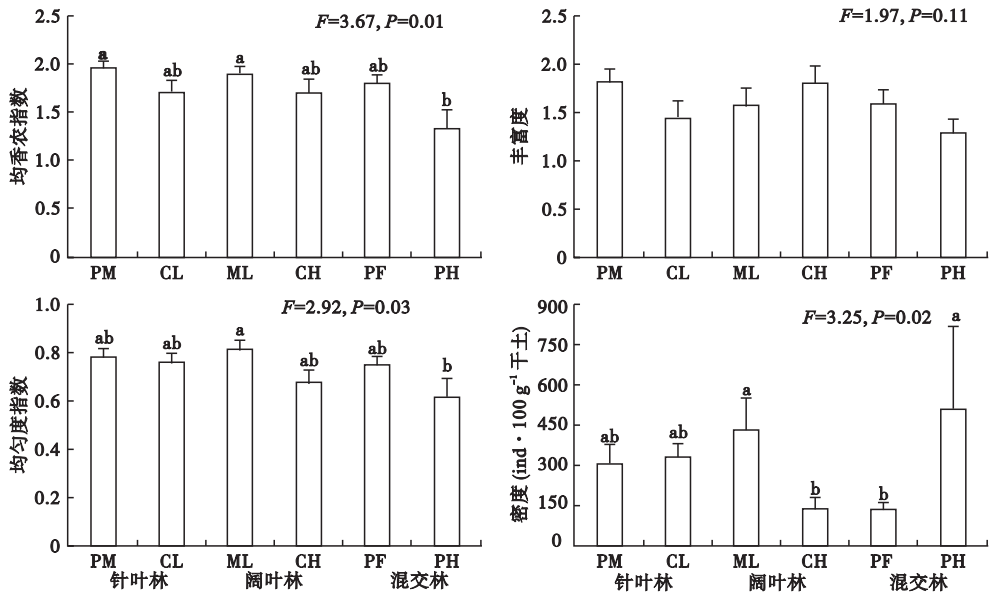


图 3　不同经营模式人工林土壤线虫群落多样性

Fig.3　Soil nematode diversity of plantation forests under different management patterns

平均值±标准误。PM:马尾松林(*Pinus massoniana*);CL:杉木林(*Cunninghamia lanceolata*);ML:米老排林(*Mytilaria laosensis*);CH:红椎林(*Castanopsis hystrix*);PF:马尾松-红椎混交林(*Pinus massoniana*+*Castanopsis hystrix*);PH:马尾松-大叶栎混交林(*Pinus massoniana*+*Castanopsis fissa*)。

林较低($P<0.05$);Shannon 指数和均匀度指数的变化趋势一致,均以马尾松林和米老排林较高,以马尾松-大叶栎混交林最低($P<0.05$);丰富度(D)在不同经营模式间无显著差异($P>0.05$)(图 3)。

2.5　不同经营模式人工林土壤线虫功能结构特征

根据土壤线虫各功能类群的 *cp* 值(表 3)计算得、PPI、PPI/MI 和 WI 指数如图 4。PPI、PPI/MI 指数以米老排林最高,WI 指数以马尾松林最高,三者均以马尾松-红椎林最低(为 0);而 MI 指数以马尾松-红椎混交林最高,马尾松林最低(图 4)。各经营模式间仅 WI 指数有显著差异($P<0.05$),而 MI、PPI、PPI/MI 指数无显著差异($P>0.05$)(图 4)。

2.6　环境因子对土壤线虫群落的影响

Pearson 相关分析(表 3)表明,多样性指数中仅有均匀度指数(E)和密度分别与有机质、全钾和土壤湿度呈显著正相关($P<0.05$ 或 $P<0.01$)。4 个功能群中,杂食-捕食性线虫与速效钾、全钾和土壤湿度呈显著正相关($P<0.05$ 或 $P<0.01$);食细菌性线虫、植物寄生类线虫与有效磷和土壤湿度呈显著正相关($P<0.05$ 或 $P<0.01$);食真菌性线虫、WI 指数均与全磷呈显著正相关($P<0.05$)。PPI 指数和 PPI/MI 指数与土壤湿度呈显著正相关($P<0.05$)。由此可知,土壤环境因子对线虫群落多样性影响较弱,但对功能群结构影响相对较强。

表 3　土壤线虫群落与土壤理化性质的相关分析

Table 3　Pearson correlations between soil nematode and soil physicochemical properties

项目	土壤湿度	pH	有机质	全氮	全磷	有效磷	全钾	速效钾
香农指数	0.18	−0.03	0.20	0.01	−0.21	−0.13	0.16	0.12
丰富度	−0.27	0.09	0.06	−0.13	−0.08	−0.17	−0.23	−0.13
均匀度指数	0.34*	0.01	0.37*	0.26	−0.07	0.11	0.21	0.16
密度	0.27	0.32	−0.03	0.18	0.18	0.27	0.43**	0.32
杂食-捕食性线虫	0.45**	0.21	−0.16	0.11	−0.07	0.21	0.41*	0.39*
食细菌线虫	0.15	0.25	0.13	0.33	0.33	0.37*	0.28	0.19
植物寄生性线虫	0.45**	0.07	−0.01	0.22	0.15	0.34*	0.15	0.18
食真菌性线虫	−0.11	0.02	0.01	0.06	0.36*	0.10	−0.06	−0.22
MI	−0.23	0.01	−0.16	0.18	−0.27	−0.12	0.05	−0.27
PPI	0.41*	0.12	0.07	0.18	0.29	0.05	0.21	0.17
PPI/MI	0.42*	0.14	0.06	0.17	0.09	0.28	0.19	0.21
WI	0.16	0.18	0.02	0.10	0.35*	0.21	0.18	0.06

* $P<0.05$; ** $P<0.01$。

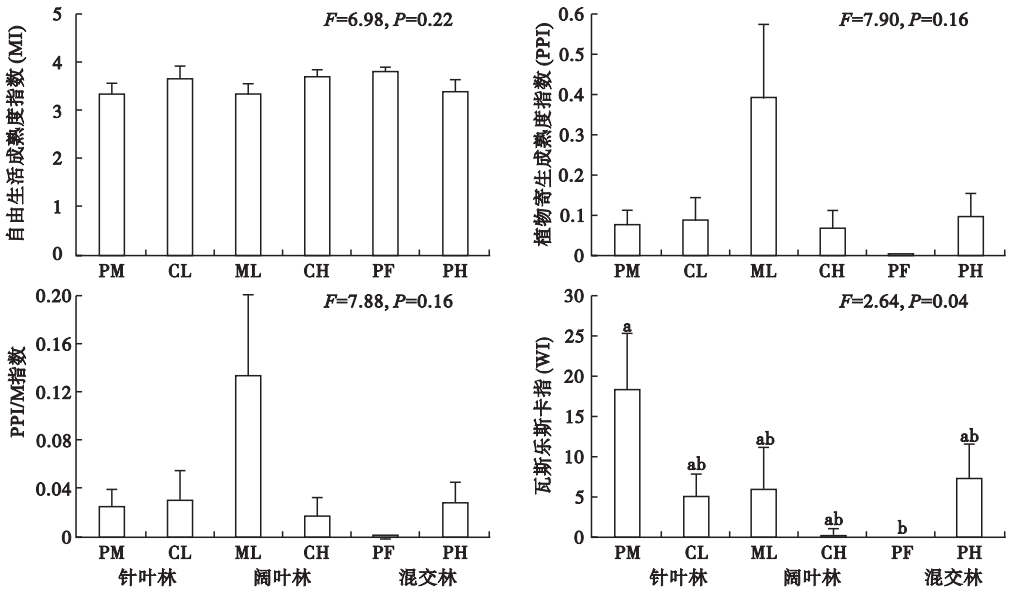


图 4 土壤线虫群落功能结构特征指数

Fig.4 Character indexes for the functional structures of soil nematodes community

平均值±标准误。PM:马尾松林(*Pinus massoniana*);CL:杉木林(*Cunninghamia lanceolata*);ML:米老排林(*Mytilaria laosensis*);CH:红椎林(*Castanopsis hystrix*);PF:马尾松-红椎混交林(*Pinus massoniana*+*Castanopsis hystrix*);PH:马尾松-大叶栎混交林(*Pinus massoniana*+*Castanopsis fissa*)。

3 结论与讨论

3.1 营造模式对线虫群落组成和多样性的影响

土壤线虫群落的分布格局在不同人工林间存在显著差异,反映了线虫对人工林营造模式不同的响应。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(Norton *et al.*,1991)。

本研究表明,基齿属、微咽属和金线属是研究区线虫群落的优势属,不同营造模式下的土壤线虫优势属表现出一定的差异性,这可能与不同营造模式人工林凋落物种类及土壤食物网结构以及干扰程度有关。优势类群对群落特征起着至关重要的作用(Liang *et al.*,1999),因此,人工林营造模式对土壤线虫群落组成结构有决定性的影响。稀有类群在各人工林不同营造模式中出现了 13、11、9、13、6 和 8 属,说明其分布范围并不狭小,它们对人工林不同营造模式下土壤线虫群落结构的作用不容忽视。

群落密度在不同营造模式间差异性显著。马尾松-大叶栎混交林土壤线虫群落密度最高,其原因之一可能由于大叶栎林地自然含水量大,而水是原生质的主要成分,供应适当更有利于细菌数量的生长(薛立等,2005),从而导致以细菌为食的食细菌性线虫这一优势类群的密度显著升高,而马尾松-大叶栎混交林土壤食细菌性线虫群落密度最高(图 1),食细菌性线虫群落密度的升高导致线虫群落密度的增加。

生物多样性能够反映群落内物种多少和食物网复杂程度(杨树泉等,2010),群落组成类群越丰富,均匀度越大,则多样性越高,而多样性的提高会促进生态系统功能的优化,并提高生态系统的稳定性(Lavorel *et al.*,1999)。综合本研究所有取样地区结果显示,马尾松林和米老排林的 Shannon 指数和均匀度指数较大,表明这两种营造模式的土壤生态系统较稳定,而马尾松-大叶栎混交林土壤生态系统的稳定性相对较低。这可能由于马尾松林和米老排林的土壤有机质和湿度较高,而这两个因子又能促进线虫群落均匀度增加(表 3)。

3.2 营造模式对线虫群落功能群组成的影响

研究表明,杂食-捕食性、食细菌性和植物寄生性线虫的密度在 6 种营造模式间存在显著差异性,其中杂食-捕食性线虫和食细菌性线虫是主要功能群。有的研究表明,杂食-捕食线虫是决定食物网复杂性的关键功能类群,一般出现在没有干扰的环境中(Polis *et al.*,1996)。而本文中,米老排林中的杂食-捕食线虫数量显著高于其他营造模式,这表明米老排林土壤线虫食物网拥有较多的营养层次,土壤食物网比其他营造模式更稳定。该区域的土壤线虫功能群结构总体上与大连滨海防护林存在明显差异(张伟东等,2013),后者是以食细菌和食真菌线虫

为群落的主要功能类群,而杂食-捕食性线虫密度最低,导致这一差异的原因可能是因滨海防护林经常受潮汐干扰造成。

食细菌性线虫相对多度高可反映土壤中细菌数量及土壤有机质的增加(Grffths *et al.*,1994)。在 6 种营造模式中,红椎林和马尾松-红椎混交林内土壤食细菌性线虫密度显著低于马尾松林、杉木林、米老排林和马尾松-大叶栎混交林,这可能是由于红椎林和马尾松-红椎混交林内的有效磷含量较低(表 1 和表 3),抑制细菌的生长繁殖,进而影响到食细菌线虫的数量。

食真菌性线虫相对多度最低,人工林不同营造模式下变化不显著。Goralczyk 等(1998)发现,林下凋落物厚及凋落物层含水量是影响食真菌线虫密度的环境因子。但本研究发现,食真菌线虫在针叶林和针阔混交林的群落中所占比例较低,而在阔叶林(米老排林和红椎林)中甚至没发现食真菌线虫。由相关分析结果(表 4)知,食真菌线虫与全磷含量有显著正相关,而阔叶林的土壤全磷含量相对较低(表 1)。因此,土壤全磷含量也可能是限制食真菌线虫的环境因子。

土壤线虫的 MI、PPI 及 PPI/MI 指数可用来反映生态系统的稳定性及其受干扰程度,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比 MI 和 PPI 指数更敏感,PPI/MI 指数越高,表明干扰程度越大,反之干扰程度越小(Bongers *et al.*,1997)。WI 指数则可反映土壤健康程度:WI>1,值越大,土壤健康状况越好;WI<1,值越小,土壤健康程度越差(Wasilewska,1994)。本研究中,不同人工林营造模式下土壤线虫的 MI、PPI 和 PPI/MI 值均无显著差异,表明 6 种营造模式的土壤稳定性和干扰情况一致。而实际情况是研究区是试验区,各种人工林内均没有放牧、砍伐等干扰活动。WI 指数在 6 种营造模式间差异显著,红椎林和马尾松-红椎林混交林的 WI 值均小于 1,而马尾松林、杉木林、米老排林和马尾松-大叶栎混交林的 WI 值均大于 1,表明红椎林和马尾松-红椎混交林土壤健康状况较差,马尾松林、杉木林、米老排林和马尾松-大叶栎混交林土壤健康状况良好。由 WI 值与土壤全磷含量呈正相关知红椎林和马尾松-红椎混交林内全磷含量较低可能是影响土壤健康状况的主要因素。

致　谢　野外调查得到中国林业科学研究院热带林业实验中心的卢立华、蔡道雄和明安刚帮助,在此致以衷心感谢!

参考文献

康　冰, 刘世荣, 蔡道雄, 等. 2009. 南亚热带杉木生态系统生物量和碳素积累及其空间分布特征. 林业科学, **45**(8): 147-153.

梁文举, 张万民, 李维光, 等. 2001. 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, **9**(3): 237-240.

林英华, 张夫道, 杨学云, 等.2004. 农田土壤动物与土壤理化性质的研究. 中国农业科学, **37**(6): 871-877.

卢立华, 蔡道雄, 贾宏炎, 等. 2009. 南亚热带 7 种林分凋落叶养分含量的年动态变化. 林业科学, **45**(4): 1-6.

盛炜彤. 1995. 我国人工用材林发展中的生态问题及治理对策. 世界林业研究, **8**(2): 51-55.

万　青, 李　季, 曹志平, 等. 2014. 温室不同种植模式对土壤线虫群落结构的影响. 中国农业大学学报, **19**(1): 107-117.

谢裕红. 2014. 营林工作与生态相结合的研究探讨. 绿色科技, (7): 68-69.

薛　立, 李　燕, 屈　明. 2005. 火力楠、荷木和黎蒴林的土壤特性及涵养水源的研究. 应用生态学报, **16**(9): 162-167.

杨树泉, 沈　向, 毛志泉, 等. 2010. 环渤海湾苹果产区老果园与连作果园土壤线虫群落特征. 生态学报, **30**(16): 4445-4451.

尹文英, 胡圣豪, 沈韫芬, 等. 1998. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社.

张伟东, 古　旭, 吕　莹, 等. 2013. 大连滨海防护林不同植被类型对土壤线虫群落的影响. 土壤通报, **44**(3): 47-52.

朱婷婷, 李　伟, 刘成刚, 等. 2014. 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, **33**(4): 1034-1041.

Bongers T, van der Meulen H, Korthals G. 1997. Inverse relationship between the nematode maturity index and plant parasite index under enriched nutrient conditions. *Applied Soil Ecology*, **6**: 195-199.

Bongers T. 1990. The maturity index: An ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition. *Oecologia*, **83**: 14-19.

De Goede RGM, Bongers T. 1994. Nematode community structure in relation to soil and vegetation characteristics. *Applied Soil Ecology*, **1**: 29-44.

Goralczyk K. 1998. Nemotodes in a coastal dune succession: Indicators of soil properties. *Applied Soil Ecology*, **9**: 465-469.

Grffths BS, Ritz K, Wheatley RE. 1994. Nematodes as indicators of enhanced microbiological activity in a Scottish organic farming. *Soil Use & Management*, **10**: 20-24.

Lavorel S, Dichardson DM. 1999. Diversity, stability and conservation of Mediterranean-type ecosystems in a changing

world: An introduction. *Diversity and Distributions*, **5**: 1-2.

Liang WJ, Lavian L, Steinberger Y. 1999. Dynamics of nematode community composition in a potato field. *Pedobiologia*, **43**: 459-469.

Neher DA. 2001. Role of nematodes in soil health and their use as indicators. *Journal of Nematology*, **33**: 161-168.

Norton DC, Niblack TL. 1991. Biology and ecology of nematodes// Nickle WR, ed. Manual of Agricultural Nematology. New York: Marcel Dekker Inc: 47-71.

Pan F, Mclaughlin NB, Yu Q, *et al*. 2010. 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*, **46**: 105-111.

Polis GA, Strong DR. 1996. Food web complexity and community dynamics. *American Naturalist*, **147**: 813-846.

Serigne TK, Callistus KPO, Alain A. 2001. Diversity of plant-parasitic nematodes and their relationships with soil physico-chemical characteristics in improved fallows in western Kenya. *Applied Soil Ecology*, **18**: 143-157.

Wang H, Liu SR, Mo JM. 2010a. Correlation between leaf litter and fine root decomposition among subtropical tree species. *Plant and Soil*, **335**: 289-298.

Wasilewska L. 1994. The effect of age of meadows on succession and diversity in soil nematode communties. *Pedobiologia*, **38**: 1-11.

Yeates GW, Bongers T. 1999. Nematode diversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **74**: 113-135.

Yeates GW. 2003. Nematodes as soil indicators: Functional and biodiversity aspects. *Biology and Fertility of Soils*, **37**: 199-210.

作者简介 王 群,女,1992 年生,硕士研究生,研究方向为土壤动物生态学。E-mail: 840939199@qq.com

责任编辑 魏中青