网络出版时间:2026-05-11　　DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.11.006

# 川南不同林龄马尾松人工林根际土壤线虫群落特征

赵丁凭[1,2],叶平[3],刘光华[4],袁亚玲[1,2],王红鑫[1,2],黄玉梅[5],肖玖金[1,2]

(1 四川农业大学 林学院,四川 成都 611130;2 长江上游森林生态与保育四川省重点实验室,四川峨眉山森林生态系统国家定位观测研究站,四川 成都 611130;3 四川卧龙国家级自然保护区管理局 四川 阿坝 623006;4 四川省林业科学研究院,四川 成都 610081;5 四川农业大学 风景园林学院,四川 成都 611130)

[摘　要] 【目的】土壤线虫群落特征可以反映马尾松人工林土壤质量和生态环境的状况,研究不同林龄马尾松人工林土壤线虫特征有助于理解种植年限对土壤养分动态的影响,从而优化植被管理。【方法】利用空间代替时间的方法,分别选取川南 11,19,26,32 年生 4 个林龄马尾松人工林根际土壤,分析 4 个林龄样地土壤线虫生物多样性和结构组成,探讨林龄对土壤线虫群落的影响以及土壤线虫与环境因子的关系。【结果】(1)本研究共分离得到土壤线虫 8 351 条,隶属于 8 目 30 科 62 属,其中威尔斯属在 4 个林龄中均为优势属。(2)11,19,26 年林龄样地土壤受干扰程度低,食物网成熟,生态系统健康,32 年林龄样地受干扰程度最高。香农-威纳多样性指数、丰富度指数以 19 年和 26 年林龄更高,优势度指数以 32 年林龄最低,均匀度指数随着林龄增加逐渐降低,营养多样性指数以 32 年林龄最高。自由生活线虫成熟度指数(MI)以 11 年林龄最大,植物寄生线虫成熟度指数(PPI)、PPI/MI 随林龄增加而增大,在 32 年林龄达到最高。(3)植物寄生线虫在 4 个林龄马尾松人工林土壤线虫中占比均最高,各林龄土壤中食细菌线虫和食真菌线虫占比随着林龄的增加而减少,食细菌类线虫在 4 个林龄中都极少。(4)土壤线虫数量与土壤含水量、硝态氮含量、有机碳含量呈极显著正相关,与土壤铵态氮、全磷和全氮含量呈显著正相关,与土壤 pH 呈显著负相关;土壤线虫丰富度指数与土壤 pH 呈极显著负相关,与土壤有机碳含量呈显著正相关;土壤线虫丰富度指数与土壤有机碳含量呈显著正相关,与土壤 pH 呈极显著负相关。【结论】马尾松人工林林龄对土壤线虫个体密度影响显著,表现为先增后减的趋势;土壤线虫的功能团和营养类群受林龄的影响,且与土壤含水量、pH 值及硝态氮、铵态氮和有机碳含量等理化性质密切相关。长期种植单一树种会降低人工林的生态稳定性,进而影响土壤线虫的生长与分布。

[关键词] 马尾松;人工林;土壤线虫;群落特征;生态系统;土壤健康

[中图分类号] S791.248;S763.3　　[文献标志码] A　　[文章编号] 1671-9387(2026)11-0049-11

# Characteristics of nematode communities in the rhizosphere soil of artificial *Pinus massoniana* stands of different ages in southern Sichuan

ZHAO Dingping[1,2], YE Ping[3], LIU Guanghua[4], YUAN Yaling[1,2], WANG Hongxin[1,2], HUANG Yumei[5], XIAO Jiujin[1,2]

(1 *College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu, Sichuan* 611130, *China*; 2 *Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation in the Upper Reaches of the Yangtze River of Sichuan Province, Sichuan Mt. Emei Forest Ecosystem National Observation and Research Station, Chengdu, Sichuan* 611130, *China*; 3 *Sichuan Wolong National Natural Reserve Administration, Aba, Sichuan* 623006, *China*; 4 *Sichuan Academy of Forestry, Chengdu, Sichuan* 610081, *China*; 5 *College of Landscape*

[收稿日期] 2025-08-25　　[修回日期] 2025-11-11

[基金项目] 四川省自然科学基金面上项目(2022NSFSC0084);四川省科技计划项目(2019YJ0427);国家自然科学基金青年科学基金项目(31400457)

[作者简介] 赵丁凭(2000－),女,四川成都人,在读硕士,主要从事人工林土壤生态系统研究。E-mail:2023204050@stu.sicau.edu.cn

[通信作者] 肖玖金(1982－),男,四川内江人,副教授,主要从事森林生态学研究。E-mail:j.xiao@sicau.edu.cn

*Architecture*, *Sichuan Agricultural University*, *Chengdu*, *Sichuan* 611130, *China*)

**Abstract**: 【Objective】 The community characteristics of soil nematodes in forests of different ages can reflect the changes in soil quality and ecological environment associated with the plantation age. This research aims to elucidate the effect of plantation age on soil nutrient dynamics by studying the soil nematode characteristics of *Pinus massoniana* plantation at different ages, thereby facilitating optimized vegetation management. 【Method】 Using the method of replacing time with space, rhizosphere soil samples were collected from four *Pinus massoniana* plantations at the age of 11, 19, 26, and 32 years in southern Sichuan. The biodiversity and structural composition of soil nematodes in these four plots were analyzed, and the effects of plantation age on soil nematode communities and the relationships between soil nematodes and environmental factors were explored. 【Result】 (1) A total of 8,351 soil nematodes were isolated in this study, belonging to 8 orders, 30 families, and 62 genera, with the genus *Wilsonema* being the dominant in the plantations of all four ages. (2) The soil in the 11-, 19-, and 26-year-old sample plots experienced low levels of disturbance, with mature food webs and healthy ecosystems, whereas the 32-year-old sample plot experienced the highest level of disturbance. The Shannon-Wiener diversity index and generic richness index of the soil in the 19- and 26-year-old plantation were higher, with the lowest Simpson index observed in the 32-year-old plantation. The evenness index gradually decreased with increasing plantation age, and trophic diversity index was the highest in the 32-year-old plantation. Maturity index (MI) was the highest in the 11-year-old plantation, whereas plant-parasitic index (PPI) and PPI/MI increased with increasing plantation age, with the highest values observed in the 32-year-old plantations. (3) Plant parasitic nematodes accounted for the highest proportion of soil nematodes in all the *Pinus massoniana* plantations of different ages, while the proportions of bacterivorous and fungivores nematodes in the soil decreased with increasing plantation age. Bacterivorous nematodes were very rare in all the plantations of different ages. (4) Soil nematode abundance showed an extremely significant positive correlation with soil water content, $NO_3^-$-N content, and total organic carbon content, a significant positive correlation with ammonium $NH_4^+$-N content, total phosphorus content, and total nitrogen content, and a significant negative correlation with soil pH. Soil nematode generic indices showed an extremely significant negative correlation with soil pH and a significant positive correlation with total organic carbon content. The soil nematode generic index showed a significant positive correlation with soil total organic carbon content and an extremely significant negative correlation with soil pH. 【Conclusion】 *Pinus massoniana* plantation age significantly influences soil nematode abundance, exhibiting a trend of increasing first and then decreasing. Functional groups and trophic levels of soil nematodes are affected by plantation age and closely associated with soil physicochemical properties (including soil water content, pH, $NO_3^-$-N content, $NH_4^+$-N content, and total nitrogen content). Long-term monoculture planting reduces the ecological stability of the plantation, thereby impacting the growth and distribution of soil nematodes.

**Key words**: *Pinus massoniana*; plantations; soil nematodes; community characteristics; ecosystem; soil health

马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)是中国南方的主要常绿针叶乔木,具有适应性强,耐干旱、瘠薄等优点,在中国林业生产及人工林生态系统中发挥着重要作用[1]。川南马尾松林分布广、面积大,但森林质量不高[2],林分单位面积蓄积仅59.04 $m^3/hm^2$,远低于中国乔木树种的平均值(89.79 $m^3/hm^2$)[3],主要原因是过度砍伐、粗放经营或无抚育经营[4]。马尾松分布于中国16个省区,包括陕西、河南、江西、浙江、福建、四川、贵州、广东和云南等地[5],是中国分布最广的松属树种。马尾松经济价值高,是中国南方林区主要的用材树种之一[6],其木材广泛应用于建筑、矿柱、坑木和制浆造纸等,在中国的森林资源总量中占有举足轻重的位置[7-8]。

土壤线虫是地球上数量最多的后生动物,具有迁移能力弱、世代周期短、功能类群丰富、占据食物网关键链、对土地利用等变化扰动响应敏感等特

点[9],是最常用的土壤质量与功能指示生物之一。一般情况下,将土壤线虫划分为四大营养类群:食细菌线虫(bacterivores,Ba)、食真菌线虫(fungivores,Fu)、植物寄生线虫(plant parasites,Pp)、捕食杂食线虫(predatorsomnivores,Op)[10]。

土壤线虫不仅能维持土壤生态体系的稳定,还能加快土壤中的物质循环及能量流动[11]。作为土壤指示动物,其群落特征可以反映出土壤的健康状况及土壤生态系统的稳定性。土壤线虫丰度、多样性等特征都会随着土壤环境的变化而表现出不同的变化趋势,其生态指数能够反映受扰动后或不同生态系统中土壤线虫群落结构和功能的变化,指示土壤有机物降解路径及食物网结构变化等特征[9]。研究表明,随着种植年限增加,植物寄生线虫将引起连作障碍,对农业可持续发展产生严重的影响。种植年限增加会使土壤的主要分解途径由细菌转化为真菌,且对土壤肥力、理化性质、酶和微生物群落产生负面影响,从而使土壤食物网遭到破坏,土壤健康状况恶化[12]。因此,本研究选取川南 11,19,26,32 年生 4 个林龄马尾松人工林为对象,分析不同林龄林下土壤线虫群落特征及其群落特征与环境因子的关系,明确不同种植年限的马尾松人工林土壤的健康状况,从而对人工林进行更有针对性的管理,实现川南马尾松人工林的可持续发展。

# 1　材料与方法

## 1.1　研究区概况

研究区位于长江上游四川省宜宾市高县来复镇森林经营所毛颠坳工区(28.589°－28.603° N,104.558°－104.573° E),地处川云公路中段,地貌以低山丘陵为主。土壤是由砂岩发育而成的山地黄壤,土壤发育完善,层次过渡明显,土层厚度约 50 cm。研究区海拔 457～533 m,属于亚热带湿润季风气候,年平均气温 18.1 ℃,5－10 月为雨季,雨量充沛,雨热同季,年降水量 1 021 mm。

## 1.2　样品采集与测定方法

1.2.1　土壤样品采集及土壤线虫分离鉴定　综合考虑地貌和林场不同地形情况,在林场选择 11,19,26,32 年生 4 个不同林龄马尾松人工林为研究对象,4 个林龄样地基本情况如表 1 所示。于 2025 年 1 月在 4 个林龄样地中各设置 3 个 20 cm×20 cm 样方,小心去除表层枯枝落叶,按“S”形五点随机取样法确定采样点,小心挖出根系,轻轻抖落大块不含根系的土壤,用无菌刷子采集根部附近 4 mm 附着的土壤,随机选取 100 g 后均分为两份,保存于保温箱中,一部分用于测定土壤线虫,另一部分用于测定土壤理化性质。

称取 50 g 土样,用 Baermann 湿漏斗法[13]分离土样中的土壤线虫,分离 48 h 后,用规格为 10 mL 的离心管收集分离液,静置约 24 h 后,去除上清液,保留 2 mL 液体,水浴锅中 60 ℃恒温水浴 3 min,再加入 6 mL 的 TAF 固定液固定线虫,静置 6 h 后,小心去除上清液,保留约 2 mL 液体。在显微镜(OLYMPUSCX23)下鉴定前 100 条线虫,对所采集到的土壤线虫鉴定至属,随后统计所有线虫数量,依据土壤含水量换算成 100 g 干土中的线虫数量(条/hg)。

**表 1　马尾松人工林样地基本情况**

Table 1　Overview of sampling sites in *Pinus massoniana* plantation

| 林龄/a<br>Forest age | 海拔/m<br>Altitude | 坡向<br>Slope aspect | 坡度/(°)<br>Slope gradient | 郁闭度<br>Canopy density | 胸径(DBH)/cm<br>Diameter at breast height |
|---|---|---|---|---|---|
| 11 | 466±11 | 东南 Southeast | 25.9±0.4 | 0.6±0.05 | 17.8±1.6 |
| 19 | 523±7 | 东南 Southeast | 26.7±3.6 | 0.6±0.05 | 22.4±3.8 |
| 26 | 559±13 | 东 East | 20.7±3.9 | 0.7±0.05 | 23.1±2.7 |
| 32 | 459±5 | 北 North | 18.1±0.2 | 0.8±0.05 | 26.0±3.5 |

1.2.2　土壤理化性质测定　参照中华人民共和国林业行业标准分别测定土壤含水量、酸碱度以及硝态氮、铵态氮、全磷、有机碳和全氮含量。土壤含水量采用环刀法测定(LY/T 1213－1999);土壤 pH 采用电位法(LY/T 1239－1999)测定;土壤硝态氮含量采用紫外分光光度法(LY/T 1230－1999)测定;土壤铵态氮含量采用浸提-靛酚蓝比色法(LY/T 1231－1999)测定;土壤全磷含量采用钼锑抗比色法(LY/T 1270－1999)测定;土壤有机碳含量采用重铬酸钾氧化-外加热法(LY/T 1237－1999)测定;土壤全氮含量采用半微量凯式定氮法(LY/T 1228－1999)测定。

1.2.3　土壤线虫指数计算　依据土壤线虫食性可将其分为食细菌线虫(Ba)、食真菌线虫(Fu)、植物寄生线虫(Pp)、捕食杂食线虫(Op)4 个营养类群[14-15];依据土壤线虫 r 策略到 k 策略的生活史策略

将其分为5个类群,分别赋予功能团值(c-p值),用于评估其在生态系统中的功能[16]。根据线虫类群及c-p值,计算不同林龄马尾松人工林土壤线虫香农-威纳多样性指数(Shannon-Wiener diversity index,$H'$)、均匀度指数(evenness index,$J'$)、优势度指数(Simpson index)、丰富度指数(generic richness index)、营养多样性指数(trophic diversity index,TD)、通路比值(nematode channel ratio,NCR)、自由线虫成熟度指数(maturity index,MI)、植物寄生线虫成熟度指数(plant parasite index,PPI)、线虫富集指数(enrichment index,EI)和结构指数(structure index,SI)[17]。

### 1.3 数据分析

使用Excel 2020软件处理原始数据并计算土壤线虫多样性指数和生态功能指数,采用SPSS 26.0对数据进行单因素方差分析(ANOVA)和Duncan's多重比较,分析不同林龄马尾松样地之间土壤线虫群落的差异。土壤线虫指标与环境因子间的关系采用Pearson's相关性分析;采用主成分分析(principal component analysis,PCA)对不同样地中的土壤线虫功能类群进行排序。采用Origin 2024绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同林龄马尾松人工林土壤线虫的群落组成

本研究共分离得到土壤线虫8 351条,隶属于8目30科62属,其中威尔斯属(*Wilsonema*)在4个林龄中均为优势属,在11,19,26和32年生马尾松人工林总个体数中分别占34.09%,16.72%,11.37%和48.49%。

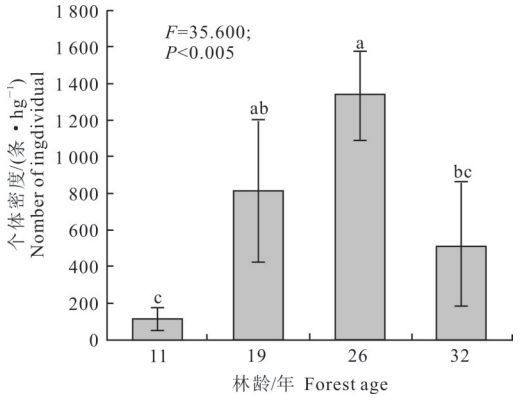
11年生马尾松人工林土壤中分离得到线虫133条,个体平均密度为115条/hg。其中,优势属为威尔斯属(*Wilsonema*),占总个体数的34.09%;常见属为穿咽属(*Nygolaimus*)、滑刃属(*Aphelenchoides*)、野外垫刃属(*Aglenchus*)等13属,占总个体数的56.83%;稀有属为克拉尔属(*Clarkus*)、垫刃属(*Tylenchus*)、头垫刃属(*Cephalenchus*)等12属,占个体总数的9.08%。

19年生马尾松人工林土壤中共分离得到线虫963条,个体平均密度为816条/hg。其中,优势属为潜根属(*Hirschmanniella*)、威尔斯属(*Wilsonema*)和垫刃属(*Tylenchus*),占总个体数的47.00%;常见属为针属(*Paratylenchus*)、盆咽属(*Panagrolaimus*)、裸矛属(*Psilenchus*)等17属,占总个体数的46.00%;稀有属为真滑刃属(*Aphelenchus*)、膜皮属(*Diphtherophora*)等19属,占总个体数的7.00%。

26年生马尾松人工林土壤中共分离得到线虫1 304条,个体平均密度为1 339条/hg。其中,优势属为针属(*Paratylenchus*)、潜根属(*Hirschmanniella*)、威尔斯属(*Wilsonema*),占总个体数的52.33%;常见属为裸矛属(*Psilenchus*)、扭沟属(*Plectonchus*)、肾状属(*Rotylenchulus*)等14属,占总个体数的40.67%;稀有属为三孔属(*Tripyla*)、中矛线属(*Mesodorylaimus*)、拟丽突属(*Acrobeloides*)等16属,占总个体数的7.00%。

32年生马尾松人工林土壤中共分离得到线虫587条,平均个体密度为512条/hg。其中,优势属为威尔斯属(*Wilsonema*),占总个数的48.33%;常见属为潜根属(*Hirschmanniella*)、单宫属(*Monhystera*)、绕线属(*Plectus*)等12属,占总个数的41.00%;稀有属为三等齿属(*Pelodera*)、头垫刃属(*Cephalenchus*)、真矛线属(*Eudorylaimus*)等27属,占总个体数的10.51%。

随着马尾松人工林林龄的增加,土壤线虫数量呈先增加后降低的变化趋势。在11年生马尾松人工林中土壤线虫总数量最低,随后在26年生马尾松人工林中土壤线虫数量达最高值,但与19年生马尾松人工林差异并不显著,而在32年生马尾松人工林中线虫数量显著下降(图1)。




图柱上标不同小写字母表示不同林龄间差异显著($P<0.05$)。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences among plantations of different ages ($P<0.05$). The same below.

图1 不同林龄马尾松人工林土壤线虫个体密度

Fig. 1 Individual density of soil nematodes in *P. massoniana* plantations of different ages

### 2.2 不同林龄马尾松人工林土壤线虫群落生态指数及区系分析

图2显示,马尾松人工林土壤线虫群落的香农-威纳多样性指数、优势度指数和丰富度指数均随着

林龄的增加呈现出先增加后下降的变化趋势，但各林龄间均无显著性差异。

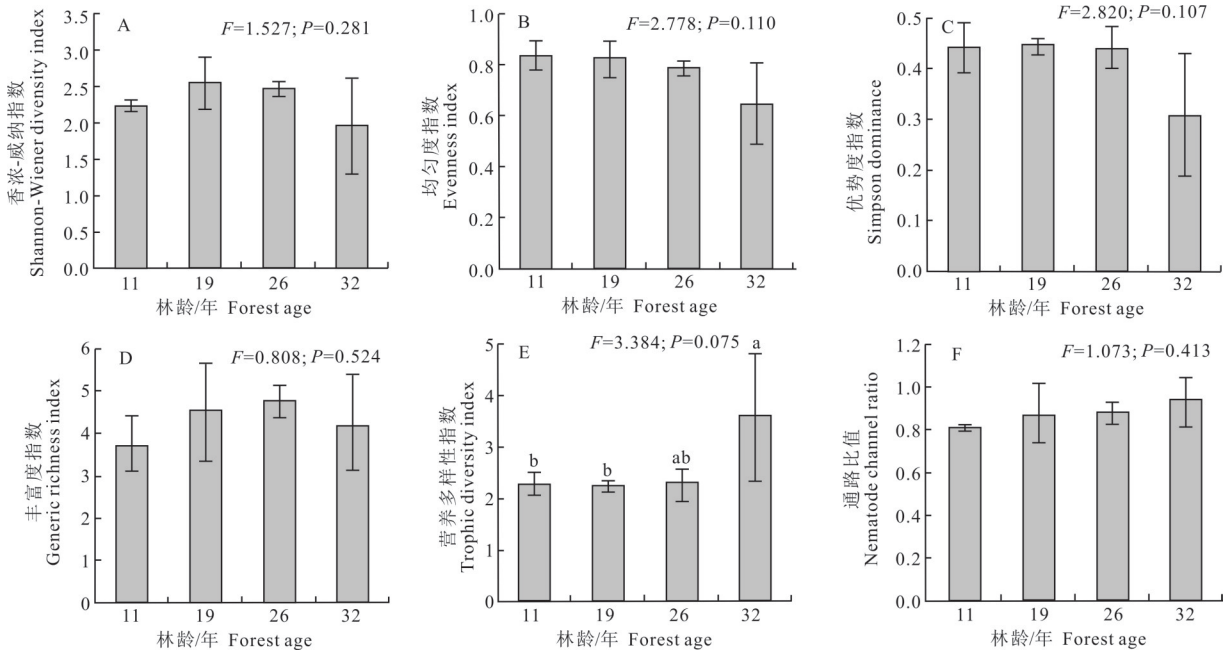



图 2　不同林龄马尾松人工林样地土壤线虫生态指数

Fig. 2　Ecological index of soil nematode in *P. massoniana* plantations of different ages

其中，香农-威纳多样性指数和丰富度指数分别在 19 和 26 年生马尾松人工林中最高，分别在 32 和 11 年生马尾松人工林中最低；土壤线虫群落优势度指数在 32 年生马尾松人工林中最低，其他林龄之间相近，表明长期的种植使林地土壤中可利用的有机物和养分减少。同时，林地土壤线虫的均匀度指数随着马尾松人工林种植年限的增加而逐渐降低，但各林龄间均无显著性差异；林地土壤线虫营养多样性在 32 年生林地中最高，且显著高于 11 年生和 19 年生马尾松人工林，但其余 3 个林地间均无显著差异。所有样地的通路指数在 0.80～0.94，且有随着林龄的增加而增大的趋势，但在各林龄林地间均无显著差异。

不同林龄马尾松人工林土壤线虫区系分析结果（图 3）表明，11，19，26 年生样地的土壤线虫区系均位于象限 B，表明土壤受干扰程度低，食物网成熟，该区域拥有较高的物种丰富性和更健康的生态系统，能够更好地应对环境变化；32 年生样地则处于象限 D，表明样地土壤受干扰程度最高，食物网退化。

### 2.3　不同林龄马尾松人工林土壤线虫群落的营养结构特征

根据土壤线虫各功能类群的 c-p 值计算得出的自由线虫成熟度指数（MI）、植物寄生线虫成熟度指数（PPI）、PPI/MI 如图 4 所示。图 4 显示，PPI 和 PPI/MI 随马尾松人工林林龄的增加而增大，均以 32 年生马尾松人工林最高，但仅 PPI 在不同林龄间有显著差异（$P<0.05$），表现为 32 和 11 年林龄均与其他林龄存在显著差异，而 19 与 26 年林龄间无显著差异；MI 的变化趋势则相反，在 11 年生马尾松人工林中最大，但在不同林龄间均无显著差异（$P>0.05$）。

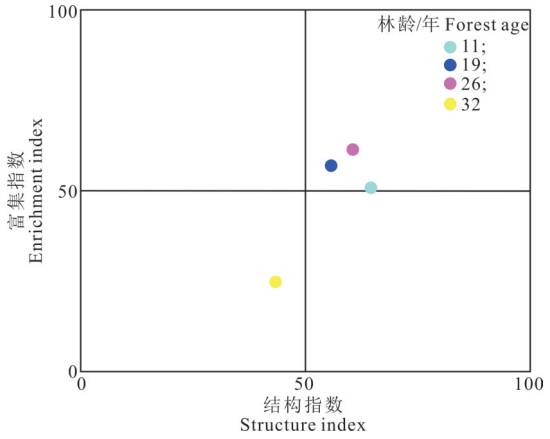



图 3　不同林龄马尾松人工林土壤线虫区系分析

Fig. 3　Analysis of soil nematode compartments in *P. massoniana* plantations of different ages

本研究结果表明植物寄生线虫（Pp）在 4 个林龄马尾松人工林土壤线虫中占比均最高，且随着林龄的增加而同步增加，分别占 11，19，26，32 年生马尾松人工林土壤线虫的 61.61%，71.85%，75.27%，

77.22%(图5)。各林龄土壤中食细菌线虫(Ba)和食真菌线虫(Fu)占比随着林龄的增加而减少。Ba土壤线虫在4个林龄中都极少,Op土壤线虫在11和32年生马尾松人工林中占比更高,分别占各林龄土壤线虫的19.83%和15.86%。

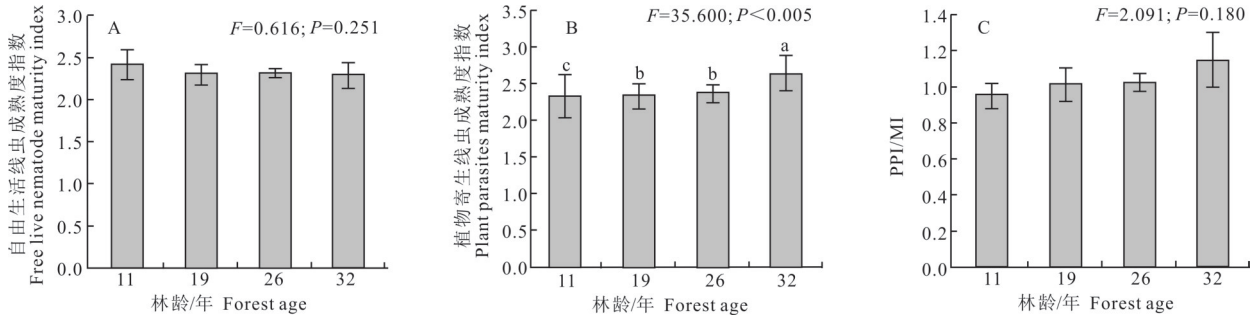
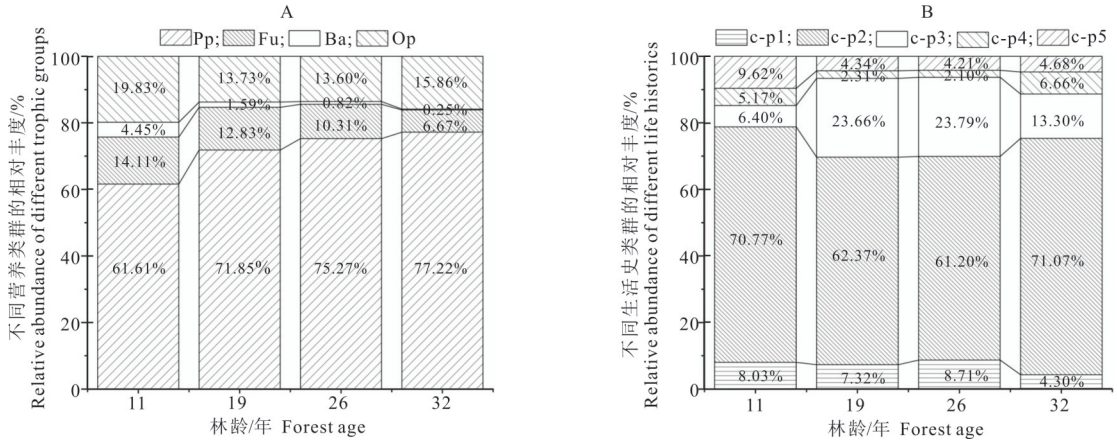



图4 不同林龄马尾松人工林土壤线虫群落功能结构特征指数

Fig. 4 Characterization index of soil nematode community functional structure in *P. massoniana* plantations of different ages

不同林龄马尾松人工林中,c-p2类群土壤线虫在4个林龄中表现出绝对优势,分别占11,19,26,32年林龄土壤线虫的70.71%,62.17%,61.20%,71.07%;c-p3类群土壤线虫随着林龄增加呈现先增加后下降的趋势,在19和26年生马尾松人工林中占比更高;c-p4类群土壤线虫变化则与c-p3类群土壤线虫相反,在11和32年生马尾松人工林中占比更高;c-p5、c-p4、c-p1类群土壤线虫在4个林龄中的占比都较少。




Op. 捕食/杂食线虫;Ba. 食细菌线虫;Fu. 食真菌线虫;Pp. 植物寄生线虫。

Op. Predatorsomnivores; Ba. Bacterivores; Fu. Fungivores; Pp. Plant parasites

图5 不同林龄马尾松人工林土壤线虫营养类群(A)及生活史类群(B)的相对丰度

Fig. 5 Relative abundance of soil nematode tropic groups (A) and life history (B) in *P. massoniana* plantations of different ages

### 2.4 不同林龄马尾松人工林土壤理化性质特征

研究区内土壤理化性质如表2所示。表2显示,随林龄增加,马尾松人工林土壤理化性质在26年生林龄时出现明显"拐点":土壤含水量呈先增加后下降的趋势,并在26年林龄时最大,且显著高于11,32年生人工林($P<0.05$);26年生马尾松人工林土壤pH显著低于11年生;土壤硝态氮、铵态氮含量呈先升后降趋势,在26年生人工林时达峰值,且显著高于其他3个林龄的马尾松人工林;土壤全磷、有机碳、全氮含量均在26年生人工林时骤升至最高,均显著高于32年生马尾松人工林,表明长期经营后土壤肥力可能退化,26年生是马尾松人工林土壤养分与水肥条件最丰沛的临界期。

### 2.5 马尾松人工林土壤线虫群落与环境因子的相互关系

以不同林龄马尾松人工林土壤线虫营养类群和c-p类群数量为响应变量,以土壤理化性质为解释变量进行主成分分析。结果(图6)表明,前两轴分别解释了土壤线虫类群的59.64%和15.92%。Ba、Fu、Op线虫营养类群与土壤有机碳、土壤全氮含量呈正相关,Pp线虫营养类群与土壤含水量以及土壤硝态氮、铵态氮、全磷、有机碳含量呈正相关。c-p1、c-p3线虫类群与土壤含水量、铵态氮、全磷含量呈正相关,c-p2线虫类群与土壤有机碳含量呈正

相关，c-p4、c-p5土壤线虫类群数量与土壤全氮含量　　呈正相关。

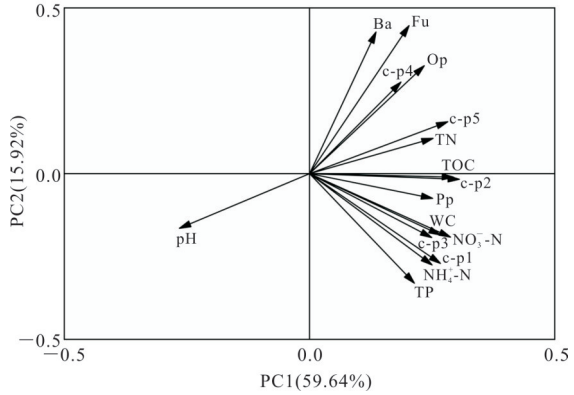
**表 2　不同林龄马尾松人工林土壤主要理化性质**

Table 2　Main soil physicochemical properties in *P. massoniana* plantations of different ages

| 林龄/年 Forest age | WC/% | pH | $NO_3^-$-N/(mg·kg$^{-1}$) | $NH_4^+$-N/(mg·kg$^{-1}$) | TP/(g·kg$^{-1}$) | TOC/(g·kg$^{-1}$) | TN/(g·kg$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 11 | 21.67±3.48 b | 3.99±0.10 a | 18.23±6.71 b | 7.38±2.25 b | 0.55±0.10 b | 6.01±0.20 b | 2.25±0.10 b |
| 19 | 26.00±1.53 ab | 3.83±0.28 ab | 22.07±1.37 b | 8.37±0.75 b | 0.45±0.07 b | 8.05±2.36 b | 2.42±1.13 ab |
| 26 | 34.67±1.67 a | 3.61±0.04 b | 53.94±8.21 a | 15.95±3.73 a | 1.05±0.37 a | 12.54±0.08 a | 3.57±0.08 a |
| 32 | 20.67±3.71 b | 3.87±0.08 ab | 21.64±6.03 b | 8.12±3.31 b | 0.68±0.06 ab | 5.56±1.05 b | 1.59±0.25 b |

注：同列数据后标不同字母表示林龄间差异显著（$P<0.05$）。WC. 土壤含水量；$NO_3^-$-N. 硝态氮含量；$NH_4^+$-N. 铵态氮含量；TP. 全磷含量；TOC. 有机碳含量；TN. 全氮含量。下同。

Note：Different letters in the same column indicate significant differences among plantations of different ages（$P<0.05$）. WC. Soil water content；$NO_3^-$-N. Nitrate nitrogen content；$NH_4^+$-N. Ammonium nitrogen content；TP. Total phosphorus content；TOC. Organic matter content；TN. Total nitrogen content. The same below.



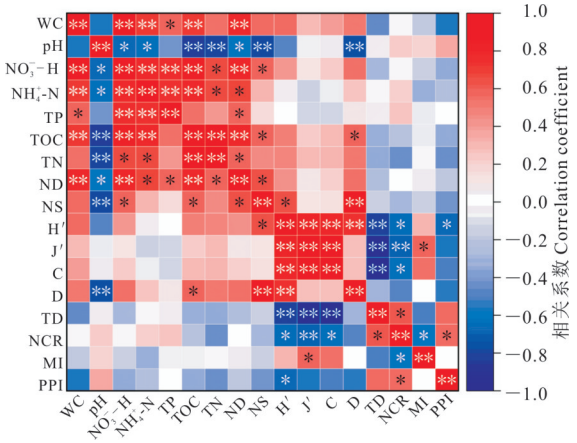

图中各符号含义同图5与表2。

The meanings of each symbol are the same as those in Fig. 5 and Table 2.

图 6　不同林龄马尾松人工林土壤线虫群落主成分分析（PCA）

Fig. 6　Principal component analysis（PCA）of soil nematode community in *P. massoniana* plantations of different ages

进一步由土壤线虫群落指标与环境因子相关性分析可知，土壤线虫群落与环境因子密切相关（图7）。其中，马尾松人工林土壤线虫数量与土壤含水量、硝态氮、有机碳含量呈极显著正相关，与土壤铵态氮、全磷和全氮含量呈显著正相关，与土壤pH呈现显著负相关。土壤线虫类群数量与土壤含水量及土壤硝态氮、铵态氮、全磷、有机碳、全氮含量呈正相关，其中与土壤硝态氮和有机碳含量显著正相关，与土壤pH呈现极显著负相关。土壤线虫香农-威纳多样性指数、均匀度指数、优势度指数与土壤含水量及土壤硝态氮、有机碳、全氮含量呈正相关，与土壤pH均呈负相关，均匀度指数、优势度指数还与土壤全磷和铵态氮含量呈负相关。土壤线虫丰富度指数与土壤pH呈极显著负相关，与土壤有机碳含量呈显著正相关。土壤线虫营养多样性指数、通路比值、自由线虫成熟度指数、植物寄生线虫成熟度指数与土壤pH呈正相关，营养多样性指数、通路比值、植物寄生线虫成熟度指数与土壤pH、有机碳含量和全氮含量呈负相关。




ND. 线虫密度；NS. 线虫类群数；$H'$. 香农-威纳多样性指数；$J'$. 均匀度指数；C. 优势度指数；D. 丰富度指数；TD. 营养多样性指数；NCR. 通路比值；MI. 自由线虫成熟度指数；PPI. 植物寄生线虫成度指数；土壤理化性质缩写同表2。

ND. The density of nematode individuals；NS. The number of nematode groups；$H'$. Shannon-Wiener diversity index；$J'$. Evennes；C. Simpson index；D. Generic richness；TD. Trophic diversity；NCR. Nematode channel ratio；MI. Maturity index；PPI. Plant parasite index；Abbreviation of soil physicochemical properties are shown in Table 2.

图 7　马尾松人工林土壤线虫指标与环境因子相关性分析

Fig. 7　Correlation analysis between nematode index and environmental factors in *P. massoniana* plantations

## 3　讨　论

### 3.1　不同林龄马尾松人工林土壤线虫群落组成及多样性特征

土壤线虫作为指示生物[18-19]，其丰度、多样性等特征都会随着土壤环境的变化而呈现出不同的变

化趋势,土壤线虫的生态指数能反映土壤中可利用资源或不同生态系统中土壤线虫群落结构和功能的变化,指示土壤有机物降解路径及食物网结构变化等特征[12]。

本研究结果表明,林龄对马尾松人工林土壤线虫的个体密度有显著影响,土壤线虫密度随着林龄的增加呈现出先上升后下降的变化趋势,个体密度以26年生马尾松人工林最高,显著高于11和32年生马尾松人工林,该结果与王巧莉等[20]、王楠等[21]研究结果一致,表明26年生马尾松人工林土壤可利用有机物等种类更丰富,含量更高,能为多种多样的土壤线虫提供更好的生存条件。本试验共分离得到土壤线虫62属,优势属为威尔斯属、潜根属和针属,4个林龄土壤中线虫的优势种存在差异,这可能与不同林龄马尾松人工林凋落物种类和土壤食物网结构有关[22-23]。

本研究中,不同林龄马尾松人工林土壤线虫群落的香农-威纳多样性指数、优势度指数和丰富度指数均随着林龄增大呈现出先上升后下降的变化趋势,这与马尾松人工林在发育过程中造成的栖息地异质性有关[24]。在林龄中期(19和26年)群落物种多样性最高,而至群落演替后期(32年),受优势种影响,群落物种多样性降低。此外,在马尾松林龄中早期,林下植物受强光照、充足水分和较高土壤温度的影响,提高了凋落物分解速率[25],同时因马尾松树冠尚未完全展开,林分中的喜光灌木和草本迅速萌发,人工林中的植物产生大量有机物,为土壤线虫提供了丰富的食物源,土壤线虫群落的香农-威纳多样性指数、优势度指数和丰富度指数上升。随着林龄的增大,通路比值逐渐增加,表明土壤生态系统的逐渐退化和相对不稳定性[26]。本试验中,所有林龄样地的通路指数在0.81~0.94,表明细菌是不同林龄马尾松人工林土壤有机质的主要分解者,这与刑树文等[27]研究结果一致。32年生马尾松人工林中土壤线虫通路比值最大,表明随着林龄的增长,土壤中真菌的生物量或活性相对增加,而细菌的生物量或活性相对减少,通路比值的增加,表明随着马尾松人工林种植年限的增加,土壤食物网中存在更多的营养级和更复杂的相互作用。均匀度指数是反映土壤线虫群落组成结构特征的一个重要指标,较为稳定的群落一般均匀度指数都较高,本试验中土壤线虫均匀度指数随林龄的增加而减小,表明在32年生马尾松人工林中,土壤线虫群落最不稳定。

### 3.2 不同林龄马尾松人工林土壤线虫群落的营养结构特征

土壤线虫群落的营养结构特征可以反映土壤生态系统的稳定性、土壤食物网结构与功能和土壤肥力与养分状况[28]。植物寄生线虫成熟度指数(PPI)可作为评价扰动后土壤恢复状况的指标之一。PPI值的大小是由植物组织对植物寄生线虫的承载能力决定的。PPI值越大,表明植被受植物寄生线虫的侵害越严重[29]。本试验中,马尾松人工林土壤线虫的PPI、PPI/MI随林龄的增加而增大,MI的变化趋势则相反。PPI、PPI/MI以32年生马尾松人工林最高,结果表明随着林龄的增加,土壤线虫中植物寄生线虫也随之增加,种植年限的增加使土壤稳定性减弱,线虫群落多以扩繁速度快的机会主义者为主,该种类的土壤线虫能够寄生于植物的各种组织,使植物发育不足,且能快速适应环境变化并大量繁殖。MI减小也反映了微生物生物量的减少和微生物群落结构的变化,土壤的受干扰程度加大[30]。这可能与各林龄阶段树木的生长和养分积累及森林的生态系统稳定性有关。26年生的树木生长状况良好,根系发达,为寄生线虫提供了优良的栖息和繁殖环境。该时期的马尾松人工林土壤中有更丰富的有机质和养分,吸引了更多的寄生线虫,促进其繁殖。26年生人工林的生态系统相对稳定,植物寄生性线虫与树木之间的相互作用处于动态平衡。32年生马尾松人工林土壤受干扰程度最大,人工林中树木长时间的竞争导致土壤养分持续被消耗,影响土壤肥力,进而影响土壤微生物活动,加剧了生态系统的脆弱性;另外,32年生人工林中可能存在较多的人为活动,如施肥、病虫害防治等,也可能使土壤质量下降,增加其受干扰程度。

植物寄生线虫在4个林龄马尾松人工林土壤线虫占比最高,且随着林龄的增加占比也相应增加,分别占11,19,26和32年林龄土壤线虫的61.61%,71.85%,75.27%,77.22%;食细菌线虫在4个林龄中占比极少。11和19年生马尾松人工林的植物寄生线虫占比减少,食细菌线虫占比增大,表明11和19年生马尾松人工林土壤线虫营养结构更健康。4个林龄较高的植物寄生线虫占比和极低的食细菌线虫占比,反映出该地区的土壤食物网中以细菌为食物来源的营养通道不畅通,食物网结构趋于简化,生态系统功能受损[31]。这可能与马尾松人工林

种植树种较单一有关。

大量研究表明，较高 c-p 值的线虫具有较长的生命周期、较低的繁殖率和较强的竞争力，如 c-p4 和 c-p5 类群，这类线虫在稳定的生态系统中常表现出优势[32-33]。较低 c-p 值的线虫有较短的生命周期、较高的繁殖率和较强的适应性，如 c-p1 和 c-p2 类群，在受到干扰的生态系统中表现出优势。本研究的马尾松人工林中 c-p2 类群土壤线虫在 4 个林龄中均表现出绝对优势，分别占 11，19，26 和 32 年林龄土壤线虫的 70.71%，62.17%，61.20%，71.07%，而 c-p4、c-p5 类群土壤线虫在 4 个林龄中的占比都较少，表明 4 个林龄的马尾松人工林都受到不同程度的干扰，生态系统较不稳定[34]，但 19 和 26 年生马尾松人工林 c-p3 类群土壤线虫占比更大，说明两者在 4 个林龄中相对稳定，受干扰程度更小。

### 3.3　马尾松人工林土壤线虫群落与环境因子的相互关系

土壤水分和养分含量是影响土壤线虫群落的重要环境因素。本研究中，土壤含水量显著影响了马尾松人工林中土壤线虫的个体数量，这是因为大多数线虫主要依附在土壤孔隙的水膜中，因此线虫密度对土壤含水量变化的响应十分灵敏。在 26 年生马尾松人工林土壤含水量显著高于 11，32 年生马尾松人工林，而 26 年生的土壤线虫个体数量也显著高于其他两个林龄，该结果与吴雨薇等[35]的研究结果相似。同时，土壤含水量对土壤线虫的生态指数和功能类群也有显著影响。本研究发现，捕食/杂食类线虫数量与土壤含水量呈显著正相关。在含水量更高的林龄土壤中拥有更多的捕食/杂食类土壤线虫，这是因为较高营养级的捕食/杂食类线虫对土壤含水量的变化响应更加灵敏。

森林中土壤铵态氮、硝态氮、有机碳和全氮含量会显著影响土壤线虫的生态指数和功能团。大量研究也表明土壤碳氮资源的变化通过影响微生物群落和植物生长[36]，从而能够改变不同营养类群线虫的食物资源状况，进而对线虫生态指数和功能团产生影响[12]。本研究中，马尾松人工林土壤食细菌线虫和食真菌线虫在总线虫数中的占比随各林龄土壤中铵态氮含量的增加而减少，该结果与张爱林等[37]的研究结果一致。过量的铵态氮会使土壤酸化，土壤酸化会抑制土壤微生物的生长和有机质的转化，改变了土壤中的营养物质平衡，进而影响线虫的食物来源和生存环境[38]，使得某些线虫的食物来源减少或质量下降，同时铵态氮的增加还可能改变土壤的物理结构，增加土壤的紧实度，影响线虫的活动和扩散，导致线虫的均匀度下降，反而使优势度增加。本研究发现，c-p1 和 c-p3 线虫类群数量与土壤含水量、铵态氮含量和全磷含量呈显著正相关，26 年生马尾松人工林中的土壤含水量、铵态氮含量和全磷含量都显著高于其他 3 个林龄，表明这类线虫对土壤肥力和水分条件的变化较为敏感[39]；c-p2 线虫类群与土壤有机碳量呈正相关，说明土壤有机碳含量的增加有助于 c-p2 线虫类群的生长和繁殖。

## 4　结　论

不同林龄马尾松木人工林根际土壤线虫群落的研究表明，林龄对土壤线虫个体密度有显著影响，土壤线虫个体密度随林龄的增加而呈现先增加后减少的趋势。林龄会影响林地土壤线虫的功能团和营养类群，这与不同林龄的土壤理化性质有密切的关系，土壤含水量、pH 值以及硝态氮、铵态氮含量和有机碳含量均会影响土壤线虫的群落组成。长期种植单一树种会导致人工林生态稳定性下降并影响土壤线虫的生长和分布。

**[参考文献]**

[1] 周政贤．中国马尾松[M]．北京：中国林业出版社，2001：53-60.
ZHOU Z X. Masson pine in China[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2001: 53-60.

[2] 雷德芳，王志杰．黔中喀斯特地区马尾松群落主要物种种间联结、生态位及群落稳定性特征[J]．生态学报，2024，44(10)：4353-4367.
LEI D F, WANG Z J, Interspecific associations, niches and community stability of main species in *Pinus massoniana* community in Karst mountainous cities, the central Guizhou Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(10): 4353-4367.

[3] 罗熳丽．川南马尾松人工林中小型土壤动物群落对林窗改造的响应[D]．成都：四川农业大学，2020.
LUO M L. Response of the meso and micro-soil faunal community to gap formation of *Pinus massoniana* artificial forest in Southern Sichuan, China [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2020.

[4] 张林林，刘效东，苏艳，等．马尾松人工林生物量与生产力研究进展[J]．生态科学，2018，37(03)：213-221.
ZHANG L L, LIU X D, SU Y, et al. Research progress on the biomass and productivity of *Pinus massoniana* plantation [J]. Ecological Science, 2018, 37(3): 213-221.

[5] 林良豹．桐棉松与乡土阔叶树混交造林试验[J]．科技信息，

2008,(22):655,477.
LIN L B. Mixed forestation experiment of tung-cotton pine and native broadleaf trees[J]. Science & Technology Information, 2008(22):655,477.

[6] 覃俊勇. 马尾松造林密度效应研究[J]. 农技服务,2017,34(22):48.
QIN J Y. A study of density effects in *Pinus massoniana* afforestation[J]. Agricultural Technology Service,2017,34(22):48.

[7] 项文化,田大伦,闫文德. 中低强度间伐对杆材阶段马尾松林生物量的影响[J]. 中南林学院学报,2001(1):10-13.
XIANG W H, TIAN D L, YAN W D. Impact of intermediate thinning on the biomass dynamic in *Pinus massoniana* stands with variant densities[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2001(1):10-13.

[8] 陈仕友,姜春前,白彦锋,等. 马尾松次生林林窗初期灌木层优势物种生态位研究[J]. 北京林业大学学报,2023,45(7):27-35.
CHEN S Y, JIANG C Q, BAI Y F, et al. Niche of dominant species in shrub layer of *Pinus massoniana* secondary forest at the initial stage of forest gap[J]. Journal of Beijing Forestry University,2023,45(7):27-35.

[9] 孝惠爽,赵杰,傅声雷. 华南典型尾叶桉纯林经营对土壤理化性质、微生物和线虫群落的影响[J]. 生态学报,2023,43(19):7963-7973.
XIAO H S, ZHAO J, FU S L. Effects of *Eucalyptus urophylla* plantations and management on soil physico-chemical properties, microbial and nematode communities in South China[J]. Acta Ecologica Sinica,2023,43(19):7963-7973.

[10] 包涵,吕丹丹,施赟,等. 豫西黄土高原果园生草对土壤线虫群落及结构的影响[J]. 草地学报,2024,32(1):96-104.
BAO H, LU D D, SHI Y, et al. Effects of orchard grass cover on soil nematode community and structure in the Loess Plateau of western Henan Province[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024,32(1):96-104.

[11] FERRIS H, BONGERS T. Nematode indicators of organic enrichment[J]. Journal of Nematology,2006,38(1):3.

[12] GUAN P T, ZHANG X K, YU J, et al. Variation of soil nematode community composition with increasing sand-fixation year of *Caragana microphylla*: bioindication for desertification restoration[J]. Ecological Engineering,2015,81:93-101.

[13] 徐菲菲,李进,任航,等. 新疆大豆根腐线虫病病原鉴定及致病性测定[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2025,53(8):73-83.
XU F F, LI J, REN H, et al. Identification and pathogenicity determination of a root-lesion nematode on soybean in Xinjiang [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2025,53(8):73-83.

[14] 赵榕江,吴纪华,何维明,等. 土壤生物多样性与外来植物入侵:进展与展望[J]. 生物多样性,2024,32(11):91-112.
ZHAO R J, WU J H, HE W M, et al. Soil biodiversity and exotic plant invasions: progress and perspectives[J]. Biodiversity Science[J],2024,32(11):91-112.

[15] BONGERS T. De Nematoden van Nederland[M]. Utrecht: Stich ting Uitgeverij Koninklijke Nederlandse Natuurhistorische Vereniging,1988.

[16] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴[M]. 北京:科学出版社,1998.
YIN W Y. Pictorical keys to soil animals of China[M]. Beijing: Science Press,1998.

[17] YEATES G W, BONGERS T, DE GOEDE R G, et al. Feeding habits in soil nematode families and genera: an outline for soil ecologists[J]. Journal of Nematology,1993,25:315-331.

[18] CHEN X Y, DANIELL T J, NEILSON R, et al. A comparison of molecular methods for monitoring soil nematodes and their use as biological indicators[J]. European Journal of Soil Biology,2010,46:319-324.

[19] MILKEREIT J, BURGER M, HODSON A. Influence of recycled organic waste amendments on carbon pools, greenhouse gas emissions, and nematode indicators of soil health[J]. Applied Soil Ecology,2025,20(8):105967-105967.

[20] 王巧莉,崔东,刘文新,等. 伊犁河谷不同林龄树上干杏林土壤线虫的群落特征[J]. 果树学报,2024,41(12):2543-2554.
WANG Q L, CUI D, LIU W X, et al. Community characteristics of soil nematode in Shushanggan apricot plantations of different ages in the Yili River Valley[J]. Journal of Fruit Science,2024,41(12):2543-2554.

[21] 王楠,黄菁华,霍娜,等. 黄土高原半干旱区不同林龄柠条人工林土壤线虫群落特征[J]. 生态学杂志,2022,41(2):236-245.
WANG N, HUANG J H, HUO N, et al. Characteristics of soil nematode communities in *Caragana korshinskii* plantations with different stand ages in semi-arid region of Loess Plateau northwest China[J]. Chinese Journal of Ecology,2022,41(2):236-245.

[22] 王群,李萌,刘世荣,等. 人工林不同营造模式对土壤线虫群落的影响[J]. 生态学杂志,2015,34(12):3443-3452.
WANG Q, LI M, LIU S R, et al. Effects of different silvicultural patterns of plantation forests on soil nematode communities[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(12): 3443-3452.

[23] 马金豪,栾军伟,王晖,等. 乔木根系和凋落物对南亚热带3种人工林土壤线虫群落的差异化影响[J]. 生态学报,2023,43(18):7367-7380.
MA J H, LUAN J W, WANG H, et al. Differential impacts of tree root and litter on soil nematode communities in three artificial stands in subtropical south China[J]. Acta Ecologica Sinica,2023,43(18):7367-7380.

[24] 张洋洋,周清慧,许骄阳,等. 林龄对马尾松人工林林下植物与土壤种子库多样性的影响[J]. 生态环境学报,2021,30(11):2121-2129.
ZHANG Y Y, ZHOU Q H, XU J Y, et al. Effects of forest ages on the diversity of understory plants and soil seed bank of *Pinus massoniana* plantations[J]. Ecology and Environmental Sciences,2021,30(11):2121-2129.

[25] 佟富春，肖以华，岑亚美，等. 广州长岗山森林土壤线虫群落的功能结构特征[J]. 北京林业大学学报，2016，38(1)：11-20.
TONG F C，XIAO Y H，CEN Y M. et al. Functional structure of soil nematode community in Changgangshan Nature Reserve of Guangzhou，southern China[J]. Journal of Beijing Forestry University，2016，38(1)：11-20.

[26] 陈云峰，韩雪梅，李钰飞，等. 线虫区系分析指示土壤食物网结构和功能研究进展[J]. 生态学报，2014，34(5)：1072-1084.
CHEN Y F，HAN X M，LI Y F，et al. Approach of nematode fauna analysis indicate the structure and function of soil food web[J]. Acta Ecologica Sinica，2014，28(5)：1072-1084.

[27] 邢树文，李云，李金林，等. 不同种植年限蕉柑根际土壤线虫群落及营养类群结构特征[J]. 果树学报，2017，34(12)：1599-1609.
XING S W，LI Y，LI J L，et al. Distribution characteristics of soil nematode communities and trophic group in the rhizosphere of *Citrus reticulata* Blanco 'Tankan' with different planting years[J]. Journal of Fruit Science，2017，34(12)：1599-1609.

[28] 寇钊阳，李春越，肖凤娇，等. 氮磷添加对黄土旱塬农田土壤线虫群落及能量结构的影响[J]. 生态学报，2024，44(5)：1962-1971.
KOU Z Y，LI C Y，XIAO F J，et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil nematode communities and energy structure in Loess Plateau farmland[J]. Acta Ecologica Sinica，2024，44(5)：1962-1971.

[29] 邓子菁，高佳楠，韩煜，等. 不同防控措施对烟田土壤线虫群落的影响[J]. 环境科学研究，2024，37(10)：2159-2170.
DENG Z J，GAO J N，HAN Y. The impact of different prevention and control measures on the nematode community in tobacco fields[J]. Research of Environmental Sciences，2024，37(10)：2159-2170.

[30] 杨贝贝，朱新萍，赵一，等. 放牧强度对干旱区高寒草地土壤线虫群落结构的影响[J]. 农业资源与环境学报，2022，39(1)：55-64.
YANG B B，ZHU X P，ZHAO Y，et al. Effects of grazing intensity on soil nematode community structure in alpine grasslands in arid region[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment，2022，39(1)：55-64.

[31] 齐月，李俊生，关潇，等. 人工林与其紧邻农田中野生植物与土壤线虫群落特征对比[J]. 环境科学研究，2020，33(6)：1469-1477.
QI Y，LI J S，GUAN X，et al. Comparison of wild plant community and soil nematode community in fast-growing poplar plantation and wheat maize rotation fields[J]. Research of Environmental Sciences，2020，33(6)：1469-1477.

[32] 谌亚，杨万勤，吴福忠，等. 川西亚高山/高山森林土壤线虫多样性[J]. 应用生态学报，2017，28(10)：3360-3368.
CHEN Y，YANG Q W，WU Z F，et al. Diversity of soil nematode communities in the subalpine and alpine forests of western Sichuan，China. [J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2017，28(10)：3360-3368.

[33] 薛会英，郭文文，屈兴乐，等. 嘎隆拉山云南铁杉林土壤线虫群落结构与多样性研究[J]. 土壤学报，2021，58(1)：246-258.
XUE H Y，GUO W W，QU X L，et al. Structure and diversity of soil nematode community in soil under *Tsuga dumosa* forest in Galongla Mountain[J]. Acta Pedologica Sinica，2021，58(1)：246-258.

[34] JIAN C，SUN B，LI X H，et al. Determinants for seasonal change of nematode community composition under long term application of organic manure in acid soil in subtropical China[J]. European Journal of Soil Biology，2013，55：91-99.

[35] 吴雨薇，罗珊，拉琼，等. 青藏高原三江源区不同恢复期高寒草甸土壤线虫群落演变[J]. 土壤，2022，54(3)：532-538.
WU Y W，LOU S，LA Q，et al. Response of soil nematode communities to restoration of alpine meadow grassland in three-river headwater region on Qinghai-Tibet plateau in different restoration periods[J]. Soils，2022，54(3)：532-538.

[36] ZHANG C，LIU G B，XUN S，et al. Soil bacterial community dynamics reflect changes in plant community and soil properties during the secondary succession of abandoned farmland in the Loess Plateau[J]. Soil Biology and Biochemistry，2016，979(5)：44-49.

[37] 张爱林，赵建宁，刘红梅，等. 氮添加对贝加尔针茅草原土壤线虫群落特征的影响[J]. 生态学报，2018，38(10)：3616-3627.
ZHANG A L，ZHAO J N，LIU H M，et al. Effects of nitrogen addition on soil nematode community characteristics in *Stipa baicalensis* steppe[J]. Acta Ecologica Sinica，2018，38(10)：3616-3627.

[38] 许真，杨晓沛，苑鑫，等. 3种放线菌剂对黄瓜根结线虫病的防治效果[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2022，50(8)：69-76，87.
XU Z，YANG X P，YUAN X，et al. Effect of three actinomycetes on cucumber root-knot nematode disease[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)，2022，50(8)：69-76，87.

[39] 赵芳，张明伟，王春雯，等. 锦鸡儿属灌丛化对草原化荒漠区土壤线虫群落组成和代谢足迹的影响[J]. 生态学报，2022，42(10)：4124-4136.
ZHAO F，ZHANG M W，WANG C W，et al. Effects of *Caragana* shrub encroachment on soil nematode community composition and metabolic footprints in steppe desert region[J]. Acta Ecologica Sinca，2022，42(10)：4124-4136.

（责任编辑：裴阿卫）