

DOI: 10.20103/j.stxb.202403270639

施赞,樊晓婧,刘俊利,张若冰,贺雨轩,付鑫磊,何长江,凡转转,何京隆,刘梦舟,王冬.凋落物输入对刺槐林土壤线虫群落结构和代谢足迹的影响.生态学报,2024,44(24):11276-11285.

Shi Y, Fan X J, Liu J L, Zhang R B, He Y X, Fu X L, He C J, Fan Z Z, He J L, Liu M Z, Wang D. Effects of litter inputs on soil nematode community structure and metabolic footprint in a *Robinia pseudoacacia* forest. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(24): 11276-11285.

凋落物输入对刺槐林土壤线虫群落结构和代谢足迹的影响

施 赞¹,樊晓婧¹,刘俊利¹,张若冰¹,贺雨轩¹,付鑫磊¹,何长江¹,凡转转¹,何京隆¹,
刘梦舟²,王 冬^{1,3,*}

1 河南大学生命科学学院, 开封 475004

2 河南大学地理与环境学院, 开封 475004

3 河南大别山森林生态系统国家野外科学观测研究站, 开封 475004

摘要:线虫是经典的土壤健康指示生物。研究选取黄土高原刺槐人工林,探究去除与添加刺槐凋落物对土壤线虫群落结构及代谢足迹的影响,旨在为西北地区人工林的可持续管理提供科学依据。结果表明:凋落物输入显著改变了线虫丰度、生态指数和代谢足迹。与对照相比,三倍凋落物处理下线虫丰度显著提高了 76.25%,线虫丰富度指数显著降低了 27.11% ($P<0.05$)。随着凋落物输入的增加,成熟度指数、瓦斯乐斯卡指数、线虫复合代谢足迹和食真菌线虫代谢足迹显著提高,而植物寄生线虫相对丰度、植物寄生线虫指数显著降低 ($P<0.05$)。冗余分析表明,微生物生物量碳、速效氮、可溶性有机碳是影响线虫群落的重要环境因子。研究表明刺槐凋落物的大量输入使线虫食物资源单一化,降低了线虫的物种多样性。然而,凋落物输入为线虫提供了充足的有机质资源及适宜的土壤生境,利于线虫丰度增加及代谢活性的提升,同时通过抑制植物寄生线虫生长繁殖,削弱了植物寄生线虫对生态系统的侵害强度,利于土壤健康。

关键词:凋落物输入;土壤线虫群落;代谢足迹;刺槐人工林

Effects of litter inputs on soil nematode community structure and metabolic footprint in a *Robinia pseudoacacia* forest

SHI Yun¹, FAN Xiaojing¹, LIU Junli¹, ZHANG Ruobing¹, HE Yuxuan¹, FU Xinlei¹, HE Changjiang¹,
FAN Zhuanzhuan¹, HE Jinglong¹, LIU Mengzhou², WANG Dong^{1,3,*}

1 School of Life Sciences, Henan University, Kaifeng 475004, China

2 The College of Geography and Environmental Science, Henan University, Kaifeng 475004, China

3 Henan Dabieshan National Field Observation and Research Station of Forest Ecosystem, Kaifeng 475004, China

Abstract: Nematodes are recognized as key indicators of soil health and essential components of soil food webs. Litter input serves as the primary energy and nutrient source for the soil food webs. Global climate change has significantly affected the quantity of plant litter input in recent years. This study, conducted from January 2018 to May 2023, explored the effects of litter removal and addition on the community structure and metabolic footprint of soil nematodes in a *Robinia pseudoacacia* forest on the Loess Plateau. The aim was to provide a scientific foundation for the sustainable management of artificial forests in the northwest region under future climate scenarios. This experiment included four treatments: no litter, natural litter,

基金项目:国家自然科学基金(32371672);河南省自然科学基金(242300421102,222300420110)

收稿日期:2024-03-27; **网络出版日期:**2024-09-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangdong19882005@163.com

double litter, and triple litter input. The results showed that litter input significantly affected the abundance, ecological indexes, and metabolic footprint of soil nematodes. Under the triple litter treatment, the abundance of soil nematode reached 1705 nematodes per 100 g dry soil, which was the highest among the four treatments. Compared to the control treatment, the nematode abundance increased significantly by 76.25%, while the species richness index decreased by 27.11% under the triple litter treatment ($P < 0.05$). The maturity index, Wasilewska index, total nematode metabolic footprint, and fungivores metabolic footprint significantly increased with the amount of litter, while the relative abundance of plant parasitic nematodes and the plant parasitic index decreased ($P < 0.05$). Correlation analysis revealed that the abundance of soil nematodes and the total nematode metabolic footprint were significantly positively correlated with soil water content. The species richness index was negatively correlated with soil microbial biomass carbon content. Additionally, the relative abundance of plant parasitic nematodes and the plant parasitic index were negatively correlated with dissolved organic carbon content. Redundancy analysis indicated that soil microbial biomass carbon content, available nitrogen, and dissolved organic carbon were key environmental factors affecting soil nematode communities. These findings suggested that excessive litter input simplified nematode food resources, thereby reducing species diversity. However, excessive *Robinia pseudoacacia* litter input provided sufficient organic matter resources and a suitable soil habitat, enhancing nematode abundance and metabolic activities. Particularly, increased litter input inhibited the growth and reproduction of plant parasitic nematodes, which, in turn, could diminish the negative impact of plant parasitic nematodes on the soil ecosystem and enhance soil health. The results elucidate the response mechanisms of soil ecosystem to litter input and predict soil health under future climate conditions in the *Robinia pseudoacacia* forest on the Loess Plateau.

Key Words: litter input; soil nematode community; metabolic footprint; *Robinia pseudoacacia* artificial forest

据估计,全球每年以地表凋落物形式向土壤中归还的有机碳约 50 Gt^[1]。植物凋落物含有土壤生物所需要的能量和养分,并通过分解作用发挥维持土壤肥力、涵养水源、提高森林生产力等重要的生态功能^[2]。近年来,大气 CO₂ 浓度上升、气温升高、降水格局改变和大气氮沉降速率增加等气候变化驱动因子及其相互作用对植物凋落物的数量及质量产生显著影响^[3-4]。植物碳输入的变化将通过改变土壤理化性质,对土壤生物的生命活动产生直接或间接的影响^[5]。土壤生物作为森林生态系统养分循环的主导者,其群落特征能够表征不同环境条件下土壤的健康状况及可持续性^[6]。因此,深入探讨土壤生物对凋落物输入变化的响应,有助于准确预测在未来植物碳输入条件下土壤生物群落的结构和组成,并科学评估气候变化产生的生态环境效应。

线虫作为土壤生态系统中的优势生物类群,在各种生境中普遍分布。它们通过取食植物根系、土壤微生物,在土壤腐屑食物网中占据多个营养级^[7],并且通过与细菌、真菌进行营养互作影响有机物的分解速率,在土壤碳循环过程中担任重要角色^[8]。由于线虫对环境变化和人类活动的扰动十分敏感,常被用作评价生态系统健康状况的生物学指标^[9]。线虫生态指数用于分析线虫群落结构和土壤受扰动程度,其中丰富度指数常用于表征线虫群落结构的多样性,成熟度指数则用于探究土壤健康状况等^[10];线虫代谢足迹常用于量化线虫能量利用、生长和呼吸的碳分配模式^[11]。凋落物作为地下食物网的主要养分来源,其自身特性及在分解过程中释放的热量和营养物质可以影响线虫的群落结构^[12]。凋落物层在一定程度上物理隔绝了外界环境与土壤之间的物质、能量交换,使土壤温湿度较为稳定,利于线虫丰度及活性的增加^[13]。此外,凋落物数量与林下植被多样性密切相关,对线虫群落的食物资源产生重要影响^[14]。由此可见,植物与土壤间具有复杂的相互作用,并对土壤线虫多样性以及群落结构等方面产生重要影响。因此,以线虫为研究对象评估植物碳输入对土壤健康的影响具有重要研究价值。

黄土高原,作为地球上面积最大、分布最集中的黄土区,不仅是治理水土流失和建设生态环境的关键区域,也因其特殊的土壤属性成为全球气候变化背景下的热点研究区域^[15]。刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.) 因具有较强的适应性和抗逆性,在保持水土和涵养水源方面发挥着重要的生态功能,是黄土高原主要的造林树

种^[16]。目前关于刺槐人工林的研究主要集中在探究限制刺槐生长的环境因子以及凋落物输入对土壤水养条件的影响方面^[17-18],而关于凋落物输入对刺槐林下土壤生物的影响方面仍存在知识缺失。因此,本研究以黄土高原刺槐人工林为研究对象,探究刺槐凋落物输入对土壤线虫群落结构与代谢足迹的影响机制,助力于科学评价气候变化下退耕人工林土壤环境状况。根据以往研究,本文假设(1)刺槐凋落物为土壤生物提供充足的有机质资源,促进土壤微生物生长,进而提高线虫丰度及物种丰富度;(2)刺槐凋落物分解向土壤生态系统释放大量养分,提高土壤中营养元素含量,将会改善黄土高原土壤状况。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

实验在豫西小秦岭北麓进行(34°29'N, 110°22'E)。研究区海拔 530—620 m,属温带大陆性季风气候,年平均气温 12.9 °C,年平均降水量 608.0 mm,无霜期 187—230 d。气候温和,四季分明。实验地坡度为 26°,土壤类型以黄绵土为主,抗蚀能力差。选取 20 世纪 90 年代“退耕还林”工程建设的刺槐人工林,林龄约为 30 年,树高平均约 11 m,林下植被主要有连翘(*Forsythia suspensa* (Thunb.) Vahl)、莎草(*Cyperus rotundus* L.)、菊叶委陵菜(*Potentilla tanacetifolia* D. F. K. Schltdl.)等。

1.2 实验设计

实验于 2018 年 1 月在刺槐人工林内选择同一坡面、坡向一致、具有相似地形的区域,划分 5 个区组,每个区组内设置 4 个 6 m×3 m 的样方,每个样方间隔 1 m,分别进行去除凋落物(No Litter, NL)、对照(Litter, L)、倍增凋落物(Double Litter, DL)和三倍凋落物(Triple Litter, TL)实验处理,共计 20 个样方。每个区组的对照处理为地上凋落物输入量不发生改变,且不做任何处理。凋落物处理具体实验方法:每月初清理、收集各区组去除凋落物处理样方内的地表可见凋落物,并称取凋落物生物量 m ,然后均匀撒入同区组倍增凋落物处理样方内,随后从区组附近区域收集质量为 2 m 的地表可见刺槐凋落物,均匀撒入三倍凋落物处理样方内。

1.3 土壤样品采集与处理

2023 年 5 月在每个样方内按五点取样法使用土钻(直径 5 cm)采集 0—20 cm 的土壤样品,将同一样方内不同取样点处土壤样品均匀混合成一个土样,装入无菌袋内,做好标记,带回实验室。剔除大型土壤动物、植物残体、石块等。土样过 2 mm 筛后分为 2 份:一份室内自然风干后用于测定土壤理化指标;一份于 4 °C 保存,用于分离、提取线虫。

土壤含水量(Soil water content, SWC)采用烘干法测定;土壤 pH 采用水浸提电位法(水土比为 2.5:1)测定;土壤可溶性有机碳含量(Dissolved organic carbon content, DOC)采用元素分析仪(vario TOC, Elementar, Germany)测定;速效氮含量(Available nitrogen content, AN)采用碱解扩散法测定;速效磷含量(Available phosphorus content, AP)采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定;土壤微生物生物量碳含量(Microbial biomass carbon, MBC)采用氯仿熏蒸-硫酸钾溶液浸提法测定^[19]。

于实验室内称取 50 g 新鲜土壤,采用改良的 Baermann 漏斗法^[9]分离线虫,分离时间为 48 h,随后 4 °C 保存于三乙醇胺-福尔马林固定液中。参照《中国土壤动物检索图鉴》^[20]以及网页 <http://Nemaplex.ucdavis.edu>,在倒置显微镜(Eclipse 80i, Nikon)下对每份线虫提取液进行线虫计数并鉴定到属。根据所得数量及对应土壤样品含水量将 100 g 干土中土壤线虫的个体数作为线虫丰度。每份样品随机抽取 100 条线虫进行鉴定,少于 100 条则全部鉴定。根据线虫取食特性及形态学特征将其划分为四个类群^[21]:食细菌线虫(Bacterivores)、食真菌线虫(Fungivores)、植物寄生线虫(Plant parasites)、杂食/捕食线虫(Omnivores-predators);同时根据线虫不同的定殖-扩散的生活史策略,将其划分为从 r-策略者向 k-策略者过渡的 5 个 colonizer-persister(c-p)类群,对鉴定得到的各属线虫进行 c-p 值的赋予^[22]。

1.4 数据处理与统计分析

采用以下生态指数分析线虫群落结构:

(1) 丰富度指数 (Species richness index, SRI)^[11]:

$$SRI = (S - 1) / \ln N$$

(2) Shannon-Weiner 多样性指数 (Shannon-Weiner diversity index, H')^[23]:

$$H' = - \sum_{i=1}^s P_i \times \ln P_i$$

(3) 线虫通路比值 (Nematode channel ratio, NCR)^[23]:

$$NCR = Ba / (Ba + Fu)$$

(4) 成熟度指数 (Maturity index, MI , 不包括植物寄生线虫)^[22]:

$$MI = \sum c(i) \times P_i$$

(5) 植物寄生线虫指数 (Plant parasite index, PPI)^[22]:

$$PPI = \sum c(i) \times P_i$$

(6) 瓦斯乐斯卡指数 (Wasilewska index, WI)^[24]:

$$WI = (Ba + Fu) / Pp$$

式中, S 为鉴定分类单元 (属) 的数目; N 为鉴定的线虫个体数目; P_i 为第 i 个线虫类群个体数在线虫总数中所占比例; $c(i)$ 为第 i 个线虫类群生活史策略的 c -p 值; Ba 、 Fu 和 Pp 分别指食细菌线虫 (Bacterivores)、食真菌线虫 (Fungivores) 和植物寄生线虫 (Plant parasites) 的数量。

根据 Ferris^[25] 在“线虫-植物专家信息系统” (<http://plpnemweb.ucdavis.edu/nemaplex>) 中列出的各类线虫生物量 (鲜重, W), 计算线虫代谢足迹 (nematode metabolic footprints, NMF), 分析线虫代谢活性。计算公式如下:

$$NMF = \sum [0.1N_t \times (W_t/m_t) + 0.273(W_t^{0.75})]$$

式中, N_t 为第 t 个线虫类群的个体数量; m_t 为第 t 个线虫类群的 c -p 值; W_t 为第 t 个线虫类群生物量 (鲜重)^[25]。

在 R 软件 (version 4.2.2) 中利用 plyr 包进行单因素方差分析 (One-way ANOVA analysis) 检验凋落物输入对土壤线虫丰度、各营养类群相对丰度、生态指数和代谢足迹的影响, 显著性水平设定为 0.05, 用平均值和标准误差表示测定结果; 采用最小显著极差法 (Least significant difference, LSD) 检验不同处理间的差异; 利用 vegan 包进行冗余分析 (Redundancy analysis, RDA) 验证环境因子与土壤线虫群落的相关性及变异解释度; 利用 corrplot 包进行相关分析探究土壤线虫群落结构指标和土壤理化因子间的相关性^[26]。

2 结果与分析

2.1 线虫丰度和营养类群相对丰度

凋落物输入显著影响土壤线虫丰度 ($P < 0.01$, 表 1、图 1)。随着凋落物输入增加, 线虫丰度显著提高, 对照处理下线虫丰度最低为 967 条/100 g 干土, 三倍凋落物处理下最高为 1705 条/100 g 干土; 对照处理线虫丰度与去除凋落物、倍增凋落物处理间无显著差异。

在不同凋落物输入处理下, 食细菌线虫均为主要营养类群, 占线虫总数的 47.68%—57.26%。凋落物输入显著改变了植物寄生线虫相对丰度, 在不同处理下排序为: 去除凋落物 > 对照 > 倍增凋落物 > 三倍凋落物, 其中倍增凋落物、三倍凋落物处理下植物寄生线虫相对丰度显著低于去除凋落物处理 ($P < 0.05$, 表 1、图 1)。

2.2 线虫生态指数

随着凋落物输入增加土壤线虫丰富度指数、植物寄生线虫指数显著降低 ($P < 0.05$), 成熟度指数、瓦斯乐斯卡指数显著增加 ($P < 0.05$), Shannon-Weiner 多样性指数、线虫通路比值无显著变化 (表 1、图 2)。土壤线虫丰富度指数在三倍凋落物处理下显著低于其它处理, 较对照处理降低了 27.11% ($P < 0.01$); 瓦斯乐斯卡指数在三倍凋落物处理下显著高于其它处理, 较对照处理提高了 105.80% ($P < 0.05$)。线虫通路比值在各处理下均大于 0.5。成熟度指数数值在去除凋落物处理下最低, 在三倍凋落物处理下最高; 而植物寄生线虫指数在

去除凋落物处理下最高,在三倍凋落物处理下最低。

表 1 土壤线虫群落单因素方差分析

Table 1 The results (<i>P</i> values) of one-way ANOVA on soil nematode community		
响应变量 Response variables	<i>F</i>	<i>P</i>
线虫总丰度 Abundance/(条/100 g 干土)	6.20	<0.01
食细菌线虫相对丰度 Relative abundance of bacterivores/%	1.72	0.20
食真菌线虫相对丰度 Relative abundance of fungivores/%	2.37	0.11
植物寄生线虫相对丰度 Relative abundance of plant parasites/%	3.99	0.03
杂食/捕食线虫相对丰度 Relative abundance of omnivores-predators/%	0.35	0.79
丰富度指数 Species richness index (SRI)	10.11	<0.01
多样性指数 Shannon-Weiner diversity index (<i>H'</i>)	1.13	0.37
线虫通路比值 Nematode channel ratio (NCR)	1.54	0.24
成熟度指数 Maturity index (<i>MI</i>)	4.09	0.03
植物寄生线虫指数 Plant parasite index (PPI)	3.69	0.03
瓦斯乐斯卡指数 Wasilewska index (<i>WI</i>)	4.84	0.01
线虫复合代谢足迹 Total nematodes metabolic footprint (TNMF)	3.31	<0.05
食细菌线虫代谢足迹 Bacterivores metabolic footprint (BAMF)	1.60	0.23
食真菌线虫代谢足迹 Fungivores metabolic footprint (FUMF)	7.26	<0.01
植物寄生线虫代谢足迹 Plant parasites metabolic footprint (PPMF)	3.07	0.06
杂食/捕食线虫代谢足迹 Omnivores-predators metabolic footprint (OPMF)	2.98	0.06

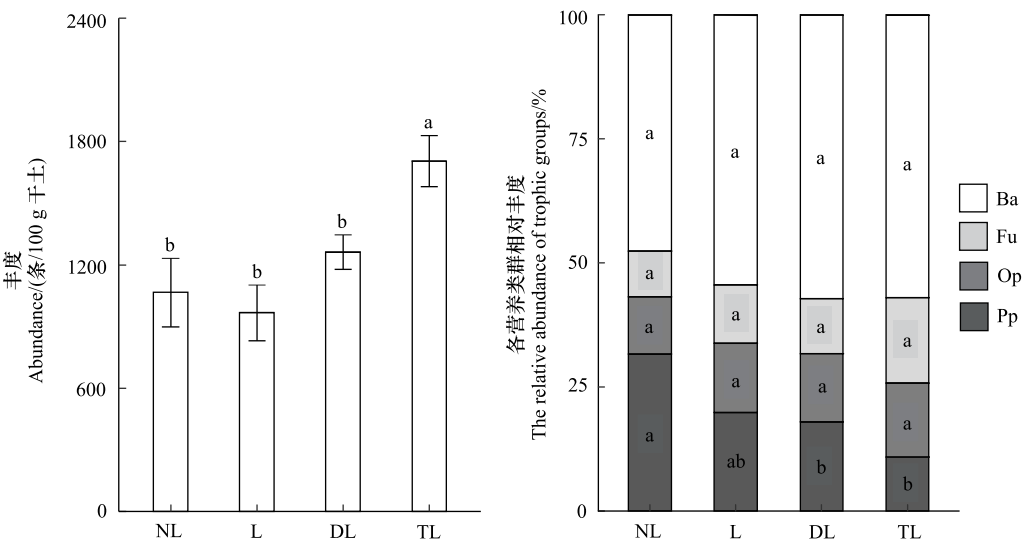


图 1 凋落物输入对土壤线虫总丰度和各营养类群相对丰度的影响(平均值±标准误)

Fig.1 Effects of litter inputs on the abundance of soil nematodes and the relative abundance of different trophic groups (Mean±SE)

NL: 去除凋落物 No Litter; L: 对照 Litter; DL: 倍增凋落物 Double Litter; TL: 三倍凋落物 Triple Litter; Ba: 食细菌线虫 Bacterivores; Fu: 食真菌线虫 Fungivores; Op: 杂食/捕食线虫 Omnivores-predators; Pp: 植物寄生线虫 Plant parasites; 不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)

2.3 土壤线虫群落代谢足迹

凋落物输入显著影响了土壤线虫复合代谢足迹及食真菌线虫代谢足迹 ($P<0.05$,表 1、图 3)。线虫复合代谢足迹在倍增凋落物处理下最高,为 979.89 $\mu\text{g}/100\text{ g}$,相较于去除凋落物处理和对照处理分别提高了 125.37%、134.16%。食真菌线虫代谢足迹在三倍凋落物处理下最高,为 44.24 $\mu\text{g}/100\text{ g}$,显著高于其它处理,较对照处理提高了 183.39% ($P<0.05$)。杂食/捕食线虫代谢足迹随着凋落物输入增加呈现上升趋势 ($P<0.10$)。

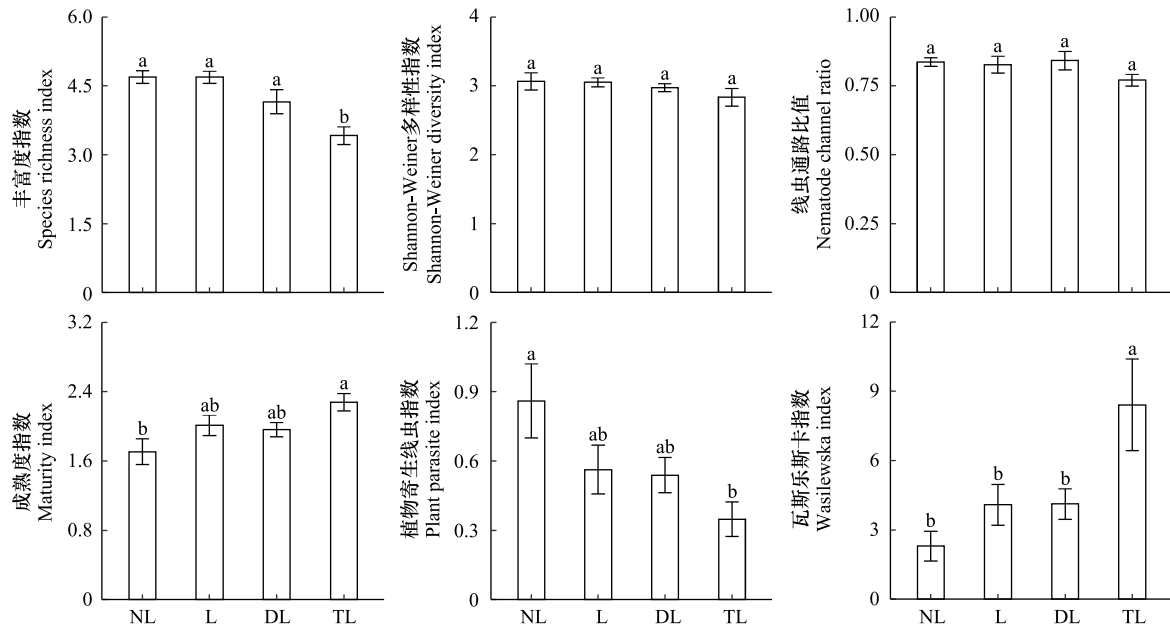


图2 凋落物输入对土壤线虫生态指数的影响(平均值±标准误)

Fig.2 Effects of litter inputs on ecological indices of soil nematodes (Mean±SE)

不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

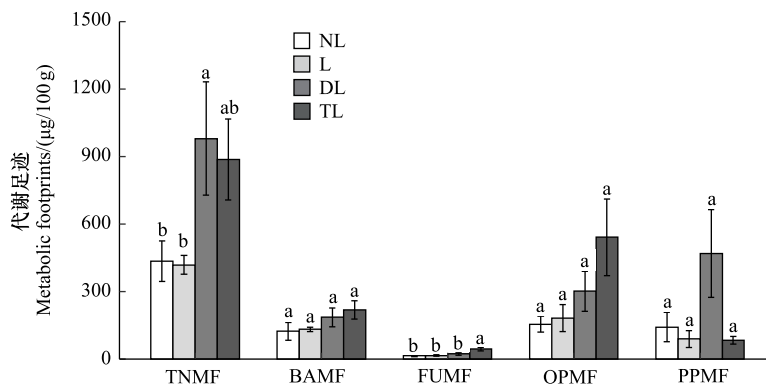


图3 凋落物输入对不同营养类群土壤线虫代谢足迹的影响(平均值±标准误)

Fig.3 Effects of litter inputs on different trophic groups of soil nematode metabolic footprints (Mean±SE)

TNMF:线虫复合代谢足迹 Total nematodes metabolic footprint; BAMF:食细菌线虫代谢足迹 Bacterivores metabolic footprint; FUMF:食真菌线虫代谢足迹 Fungivores metabolic footprint; OPMF:杂食/捕食线虫代谢足迹 Omnivores-predators metabolic footprint; PPMF:植物寄生线虫代谢足迹 Plant parasites metabolic footprint; 不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

2.4 土壤环境因子与线虫群落的相关性

冗余分析显示,线虫属水平群落结构与土壤理化指标具有较强相关性,第一主轴和第二主轴对线虫群落相对丰度方差的解释比例分别为 37%和 17%,共解释了 54%的方差变化。第一主轴上,微生物生物量碳、速效氮和可溶性有机碳是主要的影响因子;第二主轴上,速效磷是主要的影响因子。土壤速效氮、微生物生物量碳含量与土壤可溶性有机碳含量呈正相关关系,土壤 pH 与速效磷含量呈正相关关系。冗余分析结果表明土壤微生物生物量碳、速效氮和可溶性有机碳含量显著影响了线虫群落组成(图 4)。

为综合反映线虫群落结构、生态指数、代谢足迹与土壤环境因子的关系,对其进行相关性分析。结果表明,线虫丰度、线虫复合代谢足迹与土壤含水量呈显著正相关;植物寄生线虫相对丰度、植物寄生线虫指数与

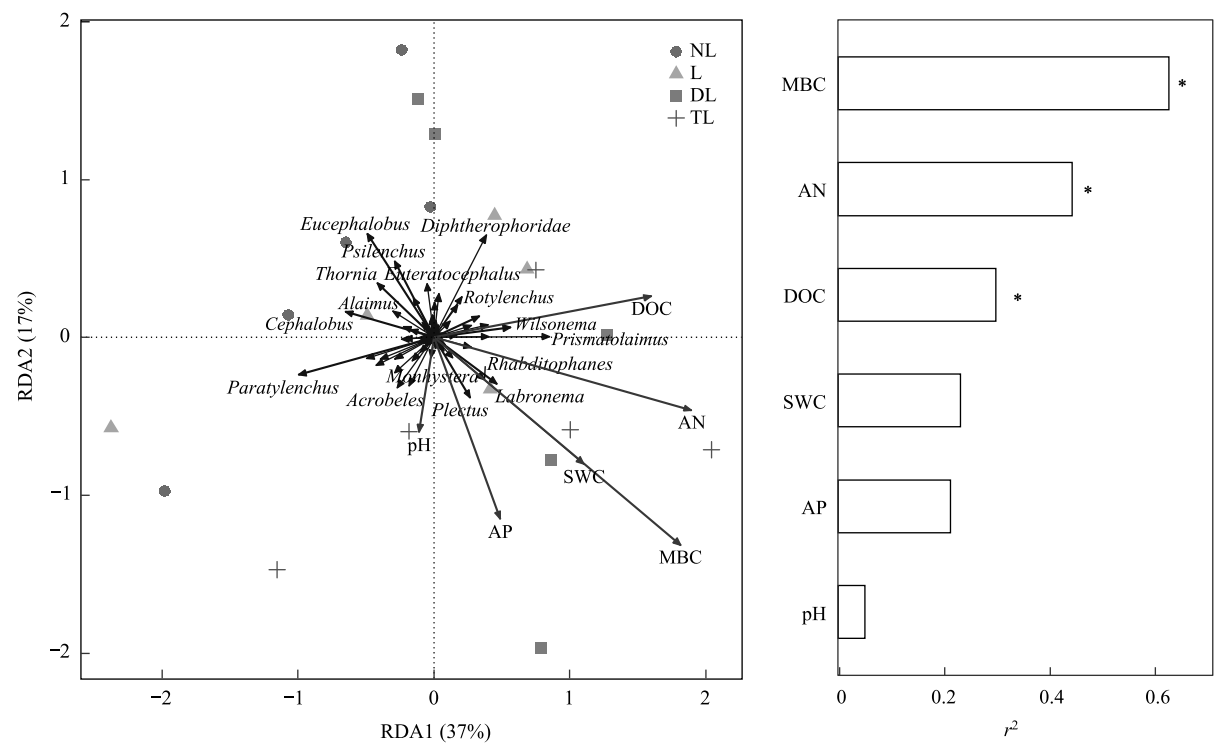


图 4 线虫群落组成与环境因子冗余分析

Fig.4 Redundancy analysis of the relationship between soil nematode community and environmental factors

MBC:微生物生物量碳 Microbial biomass carbon; AN:速效氮含量 Available nitrogen content; DOC:可溶性有机碳含量 Dissolved organic carbon content; SWC:土壤含水量 Soil water content; AP:土壤速效磷含量 Available phosphorus content; pH:土壤酸碱度 soil pH; * $P < 0.05$

土壤可溶性有机碳含量、土壤速效氮含量呈显著负相关;丰富度指数与土壤含水量、土壤微生物生物量碳含量呈显著负相关;成熟度指数与土壤可溶性有机碳、土壤速效氮含量呈显著正相关;瓦斯乐斯卡指数与土壤可溶性有机碳含量呈显著正相关;食真菌线虫代谢足迹与土壤含水量、土壤可溶性有机碳、土壤速效氮含量呈显著正相关(图 5)。

3 讨论

研究发现凋落物输入显著提高了线虫丰度,但是降低了线虫物种丰富度,这表明地上凋落物在维持线虫群落结构方面发挥着重要作用。前期研究表明凋落物积累或长期添加通过提高土壤有机质含量,为线虫提供数量充足和质量优良的底物资源,从而增加线虫数量^[27-28]。刘月等研究发现,凋落物输入可以提高土壤中的氮浓度,刺激细菌生物量的增长,为食细菌线虫提供更多的食物资源^[29]。本研究中,食细菌线虫的相对丰度及其代谢足迹均随着凋落物输入的增加呈逐渐上升的趋势,进一步证实了刘月等的结论^[29]。另一方面,Zhao等的研究表明,凋落物层可以减缓地表水分蒸发,为线虫提供稳定的土壤微环境^[13],本研究结果与其一致。由此可见,凋落物输入满足了线虫对土壤养分及土壤湿度的需求,利于线虫的生长和繁殖。此外,本研究发现,在三倍凋落物输入下线虫群落多样性显著降低,这与假设一结果不同。可能的原因是,地表凋落物层过厚阻碍了种子及幼苗接受光照,同时凋落物分解释放的碱解氮和速效磷等抑制了植物发育,降低了林下植被丰富度,进而影响部分线虫的取食活动^[30]。此外,单一物种凋落物的添加会导致部分微生物类群数量迅速增长,降低微生物群落的均匀度,从而影响食细菌线虫和食真菌线虫的物种多样性^[31]。因此,线虫种群丰度及丰富度受食物资源及其多样性的制约。

研究发现,不同线虫营养类群对凋落物输入的响应存在差异。凋落物输入显著降低了植物寄生线虫的相

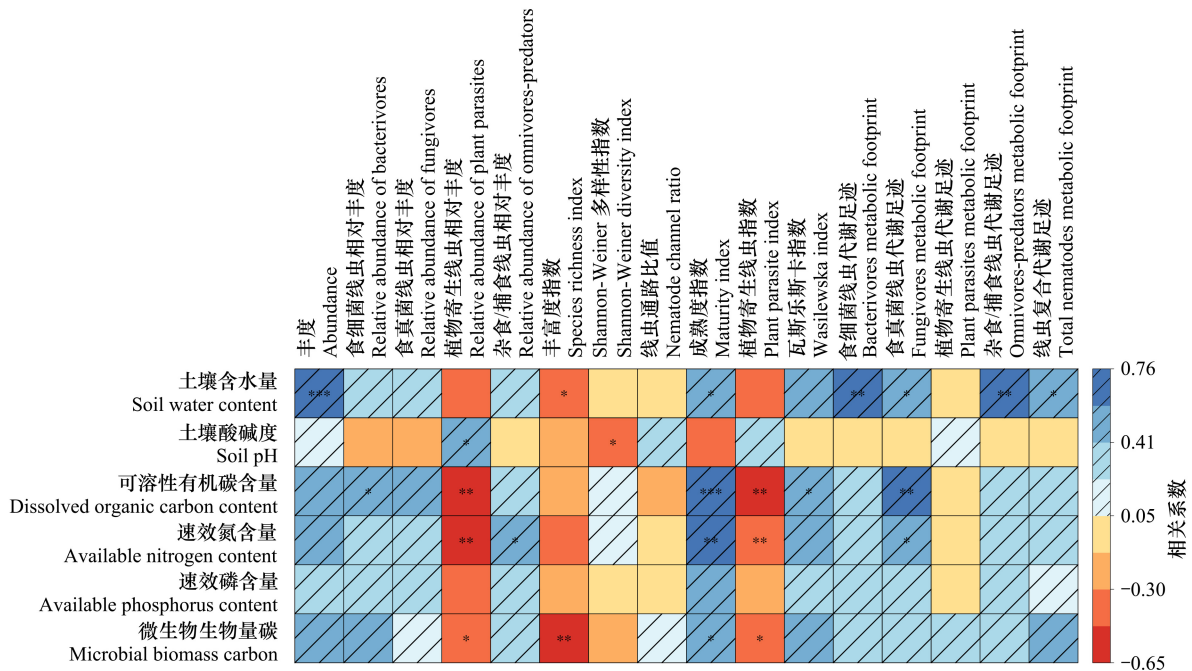


图5 土壤线虫组成、生态指数、代谢足迹与环境因子相关分析

Fig.5 Correlation analysis of soil nematode composition, ecological indices, metabolic footprint, and environmental factors

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$

对丰度,但对其它线虫营养类群的相对丰度未产生显著影响。这表明凋落物是驱动线虫群落组成的重要因素。作为土壤微食物网的第一营养级,植物寄生线虫通常以植物落叶、根系或根系分泌物为食,对地上植被群落的变化响应十分迅速^[6]。郑荧枫等的研究表明,植物寄生线虫相对丰度与土壤总碳、土壤碳磷比呈明显正相关关系^[32],但本研究结果与之相反。这可能是因为两地植物寄生线虫的食物资源多样性不同,前者研究区域内,人工林随着林龄增加,植物根系和根系分泌物增多,使得植物寄生线虫成为优势种群^[32]。而本研究中凋落物层的增厚阻碍了外来种子进入土壤,并且降低凋落物层透光度,不利于地下植被发育^[30],从而限制了部分植物寄生线虫生长,因此两地植物寄生线虫相对丰度的变化趋势相反。另一方面,本研究发现植物寄生线虫的相对丰度与土壤速效氮含量呈显著负相关。这可能是由于随着凋落物输入的增加,土壤中的铵态氮对植物寄生线虫的毒害作用增强,抑制了其生命活动^[33]。本研究中,食细菌线虫在不同凋落物处理下均为主要营养类群,这与刘月等人在黑龙江帽儿山天然次生林及人工林中的研究结果一致^[27]。刺槐凋落物分解后产生大量养分,促进微生物繁殖^[5],为食细菌和食真菌线虫提供丰富食物资源,刺激其生长增殖。而作为土壤微食物网最高营养级的杂食/捕食线虫可以直接取食食细菌与食真菌线虫^[6],同时土壤中丰富的速效氮也为杂食/捕食线虫提供了更优越的觅食环境^[34],有助于其相对丰度的增加。综上,凋落物输入通过影响植被发育和土壤理化性质,改变线虫生境及营养类群的种间竞争强度,从而引起线虫群落的营养结构变化。

线虫生态指数常用于分析线虫群落的功能结构特征,是综合评价土壤生态系统健康状况的主要指标^[26]。本研究中,不同处理下的线虫通路比值均大于 0.5,表明土壤有机质主要通过细菌分解途径为主,营养转化效率较高,代谢过程迅速^[28],能够为土壤食物网提供营养资源。线虫成熟度指数、植物寄生线虫指数和瓦斯乐斯卡指数能够反映外界环境变化对土壤线虫群落的影响,表征土壤健康程度^[22-24]。本实验中,凋落物输入的增加显著提高了成熟度指数和瓦斯乐斯卡指数,降低了植物寄生线虫指数。该结果表明,增加凋落物输入对土壤线虫群落的成熟度和稳定性具有显著促进作用,有效缓解了外界干扰因素对黄土高原刺槐人工林线虫群落的影响,与假设二内容相符。此外,研究发现,植物寄生线虫指数与土壤可溶性有机碳和速效氮含量呈显著负相关,表明在一定范围内,凋落物输入的增加限制了植物寄生线虫生命活动,促进了土壤健康^[35]。

线虫代谢足迹是度量线虫代谢活性和生态系统功能的重要指标,常用于评价食物网有效资源状况和估算线虫对生态系统服务和功能的贡献^[11]。随着凋落物输入的增加,线虫的复合代谢足迹和食真菌线虫代谢足迹显著升高,杂食/捕食线虫代谢足迹具有上升趋势,表明凋落物能够调控食物网内的能量流动,影响线虫群落的代谢活性。在三倍凋落物处理下,食真菌线虫代谢足迹显著高于其它三种处理,表明在这种处理中,进入真菌分解途径的碳和能流增多,食真菌线虫的代谢活动增强。研究发现,食真菌线虫代谢足迹与土壤可溶性有机碳、土壤速效氮含量显著正相关。这可能是因为凋落物作为外源有机物输入时,一方面通过刺激土壤微生物将有机氮转换为无机氮,增加土壤食物网中的难分解物质,使流入真菌途径的能流增多^[36-37];另一方面通过增加土壤中有效碳和有效氮的含量,刺激真菌生物量增加^[5],进而提高食真菌线虫的代谢活性。

4 结论

综上所述,凋落物是驱动黄土高原刺槐人工林土壤线虫群落营养组成的重要因素。刺槐凋落物输入为地下食物网提供了充足的养分来源,刺激了微生物数量的增加,有助于线虫丰度的提升。然而,凋落物的大量输入降低了林下植被的多样性,对线虫食物资源的多样性产生了消极影响,进而抑制了线虫群落的多样性。线虫群落特征的变化表明,随着刺槐凋落物输入的增加,土壤环境限制了植物寄生线虫数量的增长,刺槐人工林土壤食物网的稳定性得到了提高,土壤质量得到改善。因此,刺槐凋落物输入显著影响黄土高原刺槐人工林中土壤线虫的群落结构与代谢足迹。相关研究结果有助于准确预测未来凋落物输入变化下土壤生物群落结构及土壤健康状况。

参考文献 (References):

- [1] Zhang C F, Cai Y M, Zhang T, He T B, Li J, Li X Y, Zhao Q X. Litter removal increases the plant carbon input to soil in a *Pinus massoniana* plantation. *European Journal of Forest Research*, 2022, 141(5): 833-843.
- [2] Zhao L N, Yu B B, Wang M M, Zhang J, Shen Z F, Cui Y, Li J Y, Ye J, Zu W Z, Liu X J, Fan Z J, Fu S L, Shao Y H. The effects of plant resource inputs on the energy flux of soil nematodes are affected by climate and plant resource type. *Soil Ecology Letters*, 2021, 3(2): 134-144.
- [3] Feng J G, He K Y, Zhang Q F, Han M G, Zhu B. Changes in plant inputs alter soil carbon and microbial communities in forest ecosystems. *Global Change Biology*, 2022, 28(10): 3426-3440.
- [4] 武启骞, 李彦. 降水季节性分配格局对亚热带灌木凋落物分解的影响. *生态学杂志*, 2024, 43(5): 1390-1398.
- [5] Wei X Y, Wu F Z, Heděnek P, Yue K, Peng Y, Yang J, Zhang X Y, Ni X Y. Changes in soil faunal density and microbial community under altered litter input in forests and grasslands. *Fundamental Research*, 2022, 2(6): 954-963.
- [6] 杜晓芳, 李英滨, 刘芳, 宿晓琳, 李琪. 土壤微食物网结构与生态功能. *应用生态学报*, 2018, 29(2): 403-411.
- [7] Chen Y, Zhang Y, Nielsen U N, Ma Q H, Zhang X, Huang X W, Pan D F, Yue X Q, Liu J S, Wang D L. Cattle grazing mitigates the negative impacts of nitrogen addition on soil nematode communities. *Ecological Indicators*, 2021, 129: 107876.
- [8] Zhang Z Y, Wang H, Ding F, Wilschut R A, Jia Z J, Zhang X K, Zhang D, Rasmann S, Sánchez-Moreno S, Li B X. Belowground plant inputs exert higher metabolic activities and carbon use efficiency of soil nematodes than aboveground inputs. *Geoderma*, 2022, 420: 115883.
- [9] 侯春雨, 魏雪, 周磊, 马金豪, 任晓, 王玉英, 吴鹏飞. 川西北高寒地区多年生禾本科人工草地土壤线虫群落动态. *生态学报*, 2023, 43(24): 10104-10118.
- [10] Zhang G G, Sui X, Li Y, Jia M Q, Wang Z W, Han G D, Wang L C. The response of soil nematode fauna to climate drying and warming in *Stipa breviflora* desert steppe in Inner Mongolia, China. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(4): 2166-2180.
- [11] 寇钊阳, 李春越, 肖凤娇, 常顺, 王益, 党廷辉. 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. *生态学报*, 2024, 44(5): 1962-1971.
- [12] 马金豪, 栾军伟, 王晖, 叶晓丹, 王一, 明安刚, 刘世荣. 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. *生态学报*, 2023, 43(18): 7367-7380.
- [13] Zhao C C, Li Y, Zhang C L, Miao Y, Liu M Z, Zhuang W L, Shao Y H, Zhang W X, Fu S L. Considerable impacts of litter inputs on soil nematode community composition in a young *Acacia crassica* plantation. *Soil Ecology Letters*, 2021, 3(2): 145-155.
- [14] Wu Y, Zhou H K, Chen W J, Zhang Y, Wang J, Liu H F, Zhao Z W, Li Y Z, You Q M, Yang B, Liu G B, Xue S. Response of the soil food web to warming and litter removal in the Tibetan Plateau, China. *Geoderma*, 2021, 401: 115318.

- [15] Wang Z S, Miao Y F, Zou Y G, Zhao Y T, Han W X, Zhang H L, Zhang Z G, Gao C H, Zhang Z Y, Lu Y. Microcharcoals reveal more grass than trees during the mid-holocene optimum on the Chinese Loess Plateau. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(17): e2023GL103637.
- [16] Cao L, Xu M P, Liu Y S, Yu Z C, Sun L, Tian X F, Zhang Y, Shi J Y, Han X H, Yang P Z, Zhang W. Response of soil nitrogen components and its vertical distribution to rainfall redistribution during *Robinia pseudoacacia* forest restoration on the Loess Plateau. *Ecological Indicators*, 2023, 155: 111036.
- [17] 刘杰, 李宗善, 梁海斌. 黄土高原中部降水梯度上乔灌木气候响应敏感性分析. *生态学报*, 2024, 44(3): 1203-1220.
- [18] 范家伟, 朱广宇, 上官周平, 邓蕾. 黄土丘陵区刺槐林土壤团聚体稳定性和土壤可蚀性动态变化. *水土保持学报*, 2023, 37(3): 19-26.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社, 1998.
- [21] Yeates G W, Bongers T, De Goede R G, Freckman D W, Georgieva S S. Feeding habits in soil nematode families and genera-an outline for soil ecologists. *Journal of Nematology*, 1993, 25(3): 315-331.
- [22] Bongers T. The maturity index: an ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition. *Oecologia*, 1990, 83(1): 14-19.
- [23] Yeates G W. Nematodes as soil indicators: functional and biodiversity aspects. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, 37(4): 199-210.
- [24] Wasilewska L. The effect of age of meadows on succession and diversity in soil nematode communities. *Pedobiologia*, 1994, 38(1): 1-11.
- [25] Ferris H. Form and function: metabolic footprints of nematodes in the soil food web. *European Journal of Soil Biology*, 2010, 46(2): 97-104.
- [26] 包涵, 吕丹丹, 施赟, 贺雨轩, 赵金梦, 许革学, 李晓敏, 王冬. 豫西黄土高原果园生草对土壤线虫群落及结构的影响. *草地学报*, 2024, 32(1): 96-104.
- [27] 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. *生态学报*, 2023, 43(19): 7963-7973.
- [28] Zhao C C, Guo E H, Shao Y H, Zhang W X, Zhang C L, Liu Y C, Li Y, Zou X M, Fu S L. Impacts of litter addition and root presence on soil nematode community structure in a young *Eucalyptus* plantation in Southern China. *Forest Ecology and Management*, 2021, 479: 118633.
- [29] 刘月, 张利敏, 徐胜楠, 王瑶, 于鸿森, 王思琪. 高通量测序分析冻融期碳源输入方式对土壤线虫群落的影响. *生态学报*, 2022, 42(9): 3482-3493.
- [30] 姚佳峰, 郭钰, 董媛, 隋想, 吉星宇, 杨南, 魏曦, 梁文俊. 枯落物厚度对华北落叶松人工林天然更新的影响. *应用生态学报*, 2024, 35(4): 1025-1032.
- [31] 刘金花, 李风, 田桃, 肖海峰. 土壤细菌和线虫对热带雨林优势植物凋落物特性和多样性的响应. *生物多样性*, 2023, 31(11): 156-167.
- [32] 郑炎枫, 王建青, 邹秉章, 王思荣, 施秀珍, 余再鹏, 黄志群. 亚热带不同林龄杉木人工林红壤线虫群落结构特征. *林业科学*, 2022, 58(2): 80-88.
- [33] Zhang H Y, Tian M Y, Jiang M G, Yang J Y, Xu Q, Zhang Y, Ji M L, Yao Y T, Zhao C C, Miao Y. Effects of nitrogen and phosphorus additions on soil nematode community of soybean farmland. *Soil Ecology Letters*, 2023, 6(2): 230200.
- [34] Li S P, Song M, Jing S S. Effects of different carbon inputs on soil nematode abundance and community composition. *Applied Soil Ecology*, 2021, 163: 103915.
- [35] 张志委, 胡艳宇, 魏海伟, 侯双利, 殷江霞, 吕晓涛. 氮磷输入对过度放牧退化草原土壤线虫群落的影响. *应用生态学报*, 2019, 30(11): 3903-3910.
- [36] 程云云, 孙涛, 王清奎, 梁文举, 张晓珂. 模拟氮沉降对温带森林土壤线虫群落组成和代谢足迹的影响. *生态学报*, 2018, 38(2): 475-484.
- [37] 张锦新, 涂凤兰, 许恩兰, 张磊, 郭剑芬. 凋落物输入量对米槠天然林土壤氮矿化的影响. *生态学杂志*, 2022, 41(10): 1916-1922.