

昆虫与根结线虫危害对乌桕根际土壤线虫群落结构的影响

唐 璠¹, 郭文锋², 阳 莎¹, 李晓琼^{1*}

(1. 广西大学 林学院, 广西森林生态与保育重点实验室, 广西 南宁 530004;

2. 广西农业科学院, 广西作物遗传改良生物技术重点开放实验室, 广西 南宁 530007)

摘 要:地上与地下植食性害虫取食能影响植物根际土壤线虫的群落结构,但其机制尚不明确。以土壤线虫为生物指标,对地上害虫(专食性癭皮夜蛾、广食性斜纹夜蛾)及南方根结线虫的单独或共同取食对乌桕根际土壤线虫群落结构的影响差异进行研究。与无取食处理相比,癭皮夜蛾单独取食下植物寄生线虫的相对丰度显著增加,食细菌线虫的相对丰度与土壤线虫的群落多样性显著降低;斜纹夜蛾单独取食下食真菌线虫的相对丰度与土壤线虫的群落多样性均显著增加;南方根结线虫单独取食下,食真菌与食细菌线虫比例(F/B)显著升高,线虫通路比值(NCR)则显著减小。斜纹夜蛾与南方根结线虫共同取食下土壤线虫群落的食真菌线虫相对丰度显著增加。这些结果表明,与地下植食性生物相比,地上植食性昆虫对土壤线虫群落结构的影响较大,且不同食性的地上害虫对土壤线虫群落结构的调控机制不同。

关键词:地上-地下互作;线虫;群落结构;多样性;食性

中图分类号:S769

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)04-0173-07

Effects of Insect and Root-Knot Nematode Damage on the Community Structure of Rhizosphere Soil Nematodes of *Triadica sebifera*

TANG Yun¹, GUO Wen-feng², YANG Sha¹, LI Xiao-qiong^{1*}

(1. Guangxi Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation, College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China; 2. Guangxi Crop Genetic Improvement and Biotechnology Laboratory, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, Guangxi, China)

Abstract: Aboveground and belowground herbivores can affect the community structure of plant rhizosphere soil nematodes, but the mediating mechanism is still unclear. With nematodes as biological indexes, the differences in the community structure of *Triadica sebifera* rhizosphere soil nematodes were compared under the single or joint herbivory by the aboveground herbivores (the specialist *Gadirtha fusca*, and the generalist *Spodoptera litura*) and the root-knot nematode *Meloidogyne incognita*. Compared to without herbivory, the relative abundance of plant-parasites significantly increased but the relative abundance of bacterivores and community diversity of soil nematodes significantly decreased under the single herbivory by *G. fusca*; while the relative abundance of fungivores and community diversity of soil nematodes all significantly increased under the single herbivory by *S. litura*; the fungivores to bacterivores ratio (F/B) was significantly higher but the nematode channel ratio (NCR) was significantly lower under the single herbivory by *M. incognita*. The relative abundance of fungivores was significantly higher under the joint herbivory by *S. litura* and *M. incognita* compared to without herbivory. The results indicate that aboveground herbivores exert greater impacts on the community structure of soil nematodes compared with below-

收稿日期:2022-07-26 修回日期:2023-03-21

基金项目:国家自然科学基金(31800423,31660087);广西自然科学基金青基项目(2018GXNSFBA281172)。

第一作者:唐 璠。研究方向:植物与昆虫的相互作用及协同进化。E-mail:13598848483@163.com

*通信作者:李晓琼,博士,副教授。研究方向:植物与昆虫的相互作用及协同进化。E-mail:lixiaoqiong100@163.com

ground herbivores, and the regulation mechanisms of the aboveground herbivores on the community structure of soil nematodes vary greatly with diet breadth.

Key words: above-belowground interaction; nematode; community structure; diversity; diet breadth

自然界中,地上、地下植食性动物在同一寄主植物介导下发生复杂的相互作用。植物地上部诱导产生的防御物质及信号物质能转移到根部,对地下生物群落产生影响,反之亦然^[1-2]。土壤线虫是土壤中数量最丰富的后生动物,影响着许多重要的生态过程^[3-4],土壤线虫与地上植食性害虫虽生活在不同空间,但在共同寄主植物介导下能发生各种互作^[5]。Liu 等^[6]研究表明地上害虫取食增加了入侵植物空心莲子草的土壤线虫丰度。Kaplan 等^[7]发现地上昆虫对土壤线虫群落结构的影响因取食类型而异,取食叶片的毛虫能增加土壤线虫群落多样性,而吸食汁液的蚜虫则能减少土壤中的线虫多样性。Deyn 等^[8]发现地上草地雏蝗(*Chorthippus parallelus*)对植物的土壤线虫群落总丰度没有影响,而地下害虫直条叩头虫(*Agriote lineatus*)则能增加植物寄生线虫数量。然而,目前植食性生物对土壤线虫群落结构影响的研究较少^[9],地上与地下植食性生物对土壤线虫群落结构的影响强度尚不确定。

乌桕(*Triadica sebifera*)是一种大戟科(*Euphorbiaceae*)乌桕属(*Triadica*)的落叶乔木,喜光,光合能力较强,能耐短期积水,同时有一定的抗风性^[10-11]。由于乌桕叶颜色四季变化多样,观赏效果极佳,常被作为景观树种,种植于庭院、公园、景区,也常作为行道树种植与道路两边^[12]。乌桕还是中国南方重要的油料树种,乌桕油可作为食用、工业以及动力油源^[13]。乌桕的抗病能力强,病害少,但却易受虫害影响^[14],野外调查发现乌桕害虫有 8 目 53 科 189 种昆虫及 1 种瘿螨^[15]。癭皮夜蛾(*Gadirtha fusca*)是一种乌桕的专食性害虫^[16],而斜纹夜蛾(*Spodoptera litura*)是一种广食性害虫,危害范围大,易暴发成灾,对乌桕的危害也很严重^[17]。南方根结线虫(*Meloidogyne incognita*)是一种全球性的土传病原体,在乌桕的根部也频繁发生^[18]。南方根结线虫与不同类型地上害虫互作能对乌桕生长、生物量以及光合生理产生不同影响^[19-20]。本研究比较在地上害虫(癭皮夜蛾、斜纹夜蛾)及南方根结线虫的单独及共同取食处理下,乌桕根际土壤线虫群落结构的差异,探究地上、地下植食性生物及其互作对土壤线虫群落结构的影响调控机制。

1 材料与方法

1.1 试验材料的准备

试验所需种子由广西科学院桂林植物研究所采

集,试验地点为广西大学林学院实验基地(22°55'N, 108°29'E)。参照刘亚珍等^[19]的方法对乌桕(*T. sebifera*)种子进行层积处理,以打破种子休眠,提高种子发芽率。将处理后的乌桕种子放入装有混合土壤(50%壤土和 50%草炭土)的苗盘中,在广西大学林学院温室内萌芽,温室内白天温度为 28~33℃,夜间温度为 24~28℃,相对湿度约为 50%~75%。45 d 后选取长势一直的乌桕幼苗移栽入装有灭菌混合土壤的花盆(高 16 cm,直径 25 cm)中,每盆 1 株幼苗。将植物随机摆放在苗圃中,用 80 目尼龙网罩(高 100 cm,直径 27 cm)罩住整个植株,以隔绝其他地上害虫取食。

研究所需的癭皮夜蛾(*G. fusca*)、斜纹夜蛾(*S. litura*)均从野外采集,在实验室内饲养、繁殖多代,取健康无病的 2 龄幼虫供试。南方根结线虫(*M. incognita*)在番茄根上扩繁所得。

1.2 线虫接种及地上昆虫取食处理

取食试验在广西大学林学院苗圃进行,包括 3 种地上植食性生物处理(癭皮夜蛾取食、斜纹夜蛾取食、无取食)×2 种地下植食性生物处理(南方根结线虫处理、无线虫)=6 种处理,每种处理 5 次重复,共 30 盆。

参照刘维志^[21]的方法配置约 1 000 条/mL 的 2 龄根结线虫悬浮液,在乌桕幼苗根部用打孔器钻 5 个深度约为 3 mm 的小孔,用加样器向处理组根部小孔加入 2 mL 根结线虫悬浮液,线虫接种密度为 10 000 条/株,对照组加 2 mL 无菌水,之后用土壤将小孔覆盖。接种根结线虫 6 周后,开始地上害虫取食处理。

考虑到根中防御化合物的系统诱导可能需要地上植食性动物的持续取食^[22],幼苗随机分配到 3 种地上取食处理中的 1 种,连续取食 7 d 后移除所有害虫。地上取食处理每隔 3 周重复 1 次,共进行 3 次。

地上取食处理结束后,立即对盆栽土壤进行取样,收集乌桕根部周围新鲜的土壤样品 200 g,放入冰盒中带回实验室,分离土壤线虫,进行线虫群落的统计鉴定。

1.3 土壤线虫的分离与鉴定

采用 Baermann 浅盘法对土壤中线虫群落进行分离^[23]。称取 50 g 鲜土置于浅盘中的滤纸上,25℃条件下利用浅盘法分离 48 h,然后过 2 个堆叠的 500 目(30 μm)孔径钢筛收集线虫,于 60℃下热杀

死,保存在 40 g·L⁻¹ 福尔马林溶液中,用显微镜进行计数。之后根据土壤含水量将线虫个体数量换算为每 100 g 干土中含有的线虫数量^[24]。

为进一步测量土壤线虫营养类群的组成,在线虫计数后随机收集 100 条土壤线虫放在载玻片上,线虫分类鉴定参照尹文英《中国土壤动物检索图鉴》和谢辉《植物线虫分类学》。对于土壤线虫数少于 100 条的样品,需全部鉴定。使用显微镜鉴定载玻片中的土壤线虫。

1.4 指数计算

通过线虫多样性指数以及生态功能指数的计算对土壤线虫群落多样性进行分析,计算公式如下。

多样性指数^[25-26]:

- 1)物种丰富度(S)指土壤线虫的属数;
- 2)Simpson 多样性指数(D) $D=1-\sum P_i^2$;
- 3)Shannon-Wiener 多样性指数(H') $H'=-\sum P_i \cdot \ln P_i$;
- 4)Simpson 优势度指数(λ) $\lambda=\sum P_i^2$;
- 5)Margalef 丰富度指数(M_a) $M_a=(S-1)/\ln N$;
- 6)Pielou 均匀度指数(J) $J=H'/\ln S$;
- 7)线虫营养多样性指数(T_D) $T_D=1/\sum P_i^2$,

式中: P_i 是第 i 个物种的个体数占个体总数的比例, N 为线虫的个体总数, S 为所鉴定属的总数。

H' 指数、 D 指数和 λ 指数可用来描述线虫的分类多样性^[27]。而 S 、 M_a 指数用于指示群落的物种数及群落结构的复杂性^[28-29]。 J 指数描述全部物种个体数目分配状况。 T_D 代表线虫群落的多样性,取值范围 0~4,数值越大,多样性越丰富。

生态功能指数:

- 1)食真菌与食细菌线虫比例(F/B) $F/B=FF/BF$;
- 2)线虫通路比值(NCR) $NCR=BF/(FF+BF)$ ^[30];
- 3)瓦斯乐斯卡指数(WI) $WI=(FF+BF)/PP$ ^[31];

FF、BF、PP 分别为食真菌线虫、食细菌线虫、植物寄生线虫的相对多度。

F/B 指数、NCR 指数用于指示土壤有机质分解途径,WI 表示承担土壤矿化途径的主要为植物寄生线虫还是自由生活的食细菌食真菌线虫类型^[32]。

1.5 数据统计与分析

采用广义线性模型中的线性模型分别比较地上植食性生物处理和地下植食性生物处理对各营养类群相对丰度、物种多样性指数(Simpson 多样性指数、Shannon-Wiener 指数、优势度指数、丰富度指

数、均匀度指数、线虫营养多样性指数)、生态功能指数(线虫通路比值、瓦斯乐斯卡指数、食真菌与食细菌线虫比例),将地上植食性生物处理和地下植食性生物处理作为固定因素,并考虑两者的交互效应。然后用 Tukey 对差异显著的因变量进行多重比较。全部数据运用 SPSS 26 软件进行分析,图表均采用 SigmaPlot 14.0 绘制。

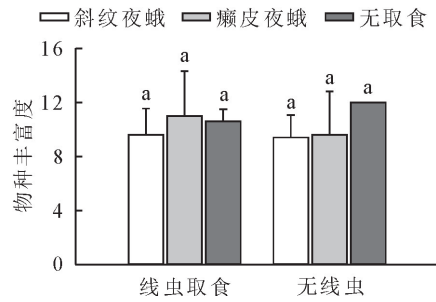
2 结果与分析

2.1 土壤线虫群落组成

共分离出 15 个科、20 个属的土壤线虫,根据线虫的食性,将线虫分为食细菌线虫(Bacterivores)、食真菌线虫(Fungivores)、植物寄生线虫(Plant-parasites)和杂食/捕食线虫(Omnivores-predators) 4 个营养类群^[33]。其中植物寄生线虫 5 个属,食细菌线虫(BF)4 个属,食真菌线虫(FF)4 个属,杂食/捕食线虫(OP)2 个属(表 1)。不同处理下物种丰富度(S)的差异未达到显著水平。

表 1 土壤线虫分类统计
Table 1 Taxonomy of soil nematodes

营养类群	科	属
植物寄生线虫	垫刃科 Tylenchidae	垫刃属 <i>Tylenchus</i>
		裸矛属 <i>Psilenchus</i>
	针科 Paratylenchidae	针属 <i>Paratylenchus</i>
	短体科 Pratylenchidae	短体属 <i>Pratylenchus</i>
	肾形科 Rotylenchulidae	肾形属 <i>Rotylenchulus</i>
	刺科 Belonolaimidae	矮化属 <i>Tylenchorhynchus</i>
食细菌线虫	头叶科 Cephalobidae	头叶属 <i>Cephalobus</i>
		丽突属 <i>Acrobeles</i>
		拟丽突属 <i>Acrobeloides</i>
	无咽科 Alaimidae	无咽属 <i>Alaimus</i>
	小杆科 Rhabditidae	小杆属 <i>Rhabditis</i>
		钩唇属 <i>Diploseter</i>
食真菌线虫	单宫科 Monhysteridae	单宫属 <i>Monhystera</i>
		棱咽属 <i>Prismatolaimus</i>
	垫咽科 Tylencholaimidae	垫咽属 <i>Tylencholaimus</i>
	膜皮科 Diphtherophoridae	膜皮属 <i>Diphtherophora</i>
	滑刃科 Aphelenchoididae	滑刃属 <i>Aphelenchoides</i>
	真滑刃科 Aphelenchidae	真滑刃属 <i>Aphelenchus</i>
捕食/杂食线虫	矛线科 Dorylaimidae	矛线属 <i>Dorylaimus</i>
	单齿科 Mononchidae	单齿属 <i>Mononchus</i>



不同字母表示多重比较结果在 $P < 0.05$ 水平差异显著。下同。

图 1 地上-地上取食处理对土壤线虫群落物种丰富度的影响

Fig. 1 Effects of above-belowground herbivory treatment on species richness of soil nematodes

表 2 土壤线虫各营养类群相对丰度、物种多样性指数的方差分析表

Table 2 ANOVA results of relative abundance, species diversity index, and ecological function indexes of soil nematode community

差异因素		AG(2,24)		BG(1,24)		AG×BG(2,24)	
		<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
相对丰度	PP	105.143	<0.001	0.001	0.974	1.231	0.540
	BF	63.920	<0.001	2.002	0.157	2.014	0.365
	FF	53.850	<0.001	3.807	0.051	6.160	0.046
	OP	2.577	0.276	0.398	0.528	0.837	0.658
多样性指数	<i>H'</i>	80.301	<0.001	0.020	0.888	0.277	0.871
<i>D</i>	92.261	<0.001	0.202	0.653	1.509	0.470	
<i>S</i>	4.251	0.119	0.009	0.926	2.578	0.275	
<i>λ</i>	92.255	<0.001	0.202	0.653	1.509	0.470	
<i>Ma</i>	4.489	0.106	0.138	0.710	1.307	0.520	
<i>J</i>	100.346	<0.001	0.260	0.610	3.199	0.202	
<i>TD</i>	109.217	<0.001	0.189	0.664	2.325	0.313	
生态功能指数	F/B	10.859	0.004	10.053	0.002	6.226	0.044
NCR	10.639	0.005	10.950	0.001	6.850	0.033	
WI	76.209	<0.001	0.009	0.926	0.529	0.768	

注:在 $P < 0.05$ 水平差异显著的结果以加粗表示。

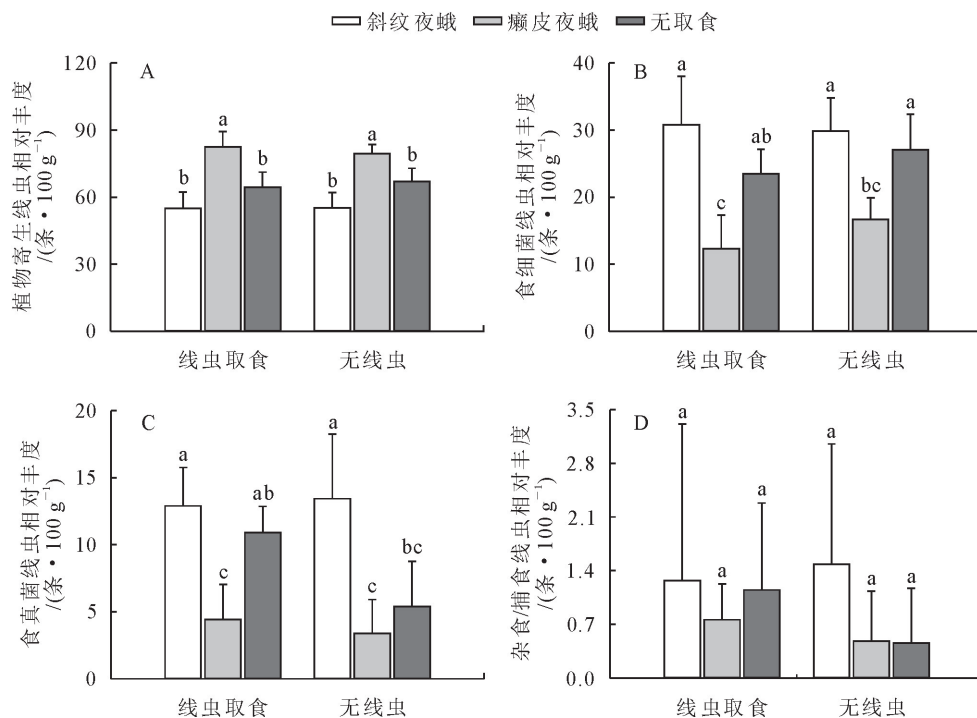


图 2 地上-地上取食处理对各营养类群相对丰度的影响

Fig. 2 Effects of above-belowground herbivory treatment on relative abundance of different trophic groups

(λ)、Pielou 均匀度指数(J)、线虫营养多样性指数(T_D)受地上植食性生物处理的显著影响(表 2)。与无任何取食相比,斜纹夜蛾取食处理下, J 指数、 T_D

指数显著升高(图 3D、图 3F)。癭皮夜蛾处理下, D 指数(图 3A)、 H' 指数(图 3B)、 J 指数(图 3D)、 T_D 指数(图 3F)显著降低, λ 指数(图 3C)显著升高。

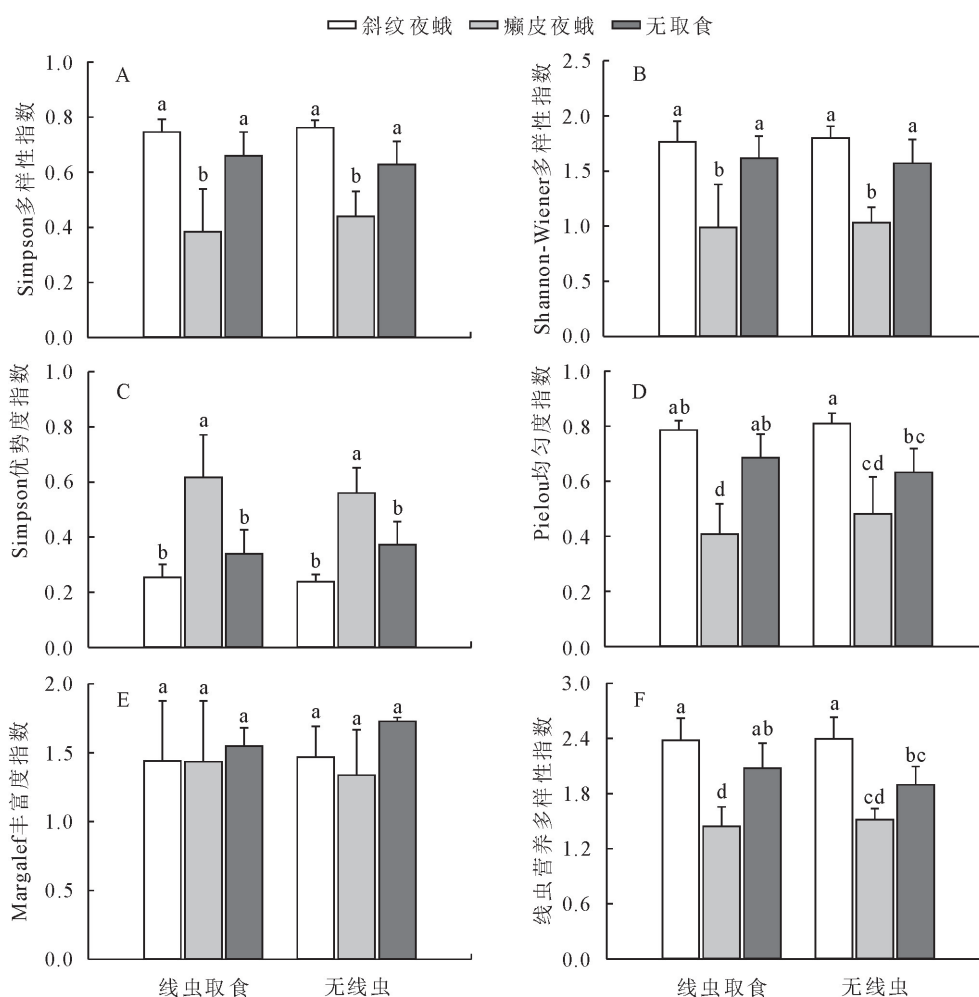


图3 地上-地上取食处理对土壤线虫群落多样性指数的影响

Fig. 3 Effects of above-belowground herbivory treatment on community diversity indexes of soil nematodes

2.4 土壤线虫群落生态功能指数

F/B 指数、NCR 指数显著受地上-地下植食性生物处理的交互影响(表 2),南方根结线虫接种处理影响下,F/B 指数(图 4A)显著增加、NCR 指数(图 4B)显著降低。WI 只受地上植食性生物处理的显著影响(表 2)。斜纹夜蛾取食处理下的土壤线虫群落 WI 值均显著高于癭皮夜蛾处理,与是否存在南方根结线虫取食无关(图 4C)。

3 结论与讨论

3.1 结论

地上、地下植食性生物常在同一寄主植物介导下发生复杂的相互作用^[34]。本研究发现南方根结线虫单独取食及其与 2 种地上不同食性害虫互作对乌桕根际土壤线虫的群落多样性的影响并不显著,但 2 种地上害虫却能对土壤线虫的群落结构产生显著影响且影响机制不同:癭皮夜蛾取食显著增加了

土壤中优势的植物寄生线虫数量,降低了乌桕根际土壤线虫的群落多样性,而斜纹夜蛾取食则显著增加了土壤线虫的群落多样性。这说明与地下植食性生物相比,地上植食性昆虫对土壤线虫群落结构的影响较大,且不同食性的地上害虫对土壤线虫群落结构的调控机制不同。

3.2 讨论

3.2.1 昆虫与根结线虫危害对线虫营养类群的影响 研究结果显示专食性癭皮夜蛾取食处理增加了植物寄生线虫的相对丰度,但降低了食细菌、食真菌线虫相对丰度;而广食性斜纹夜蛾处理则对这 3 种营养类群的相对丰度影响不显著。Li 等^[35]研究在癭皮夜蛾与南方根结线虫联合取食下,乌桕会将更多的资源分配给地下部分,这可能是癭皮夜蛾取食下植物寄生线虫相对丰度增加的原因。类似的 Machado 等^[36]发现烟草天蛾(*Manduca sexta*)取食烟草(*Nicotiana attenuata*)叶片增加了田间植物寄

生线虫的数量。本研究结果表明专食性昆虫取食会对线虫营养类群产生显著影响。不同于本研究的结果,刘佳等^[5]发现广食性虾钳菜拔龟甲(*Cassida piperata*)取食显著提高了莲子草(*Alternanthera sessilis*)和空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)根际土壤植物寄生线虫的相对丰度,但专食性莲草直胸跳甲(*Agasicles hygrophila*)取食对各营养类群相对丰度的影响未达到显著水平。Wardle 等^[37]发现植物寄生线虫的群内多样性受到植物物种的影响,这可能是造成不同研究结果的原因之一。此外,地上取食诱导的土壤微环境的改变及植物对线虫抗性的改变也可能对线虫丰度产生影响^[38]。

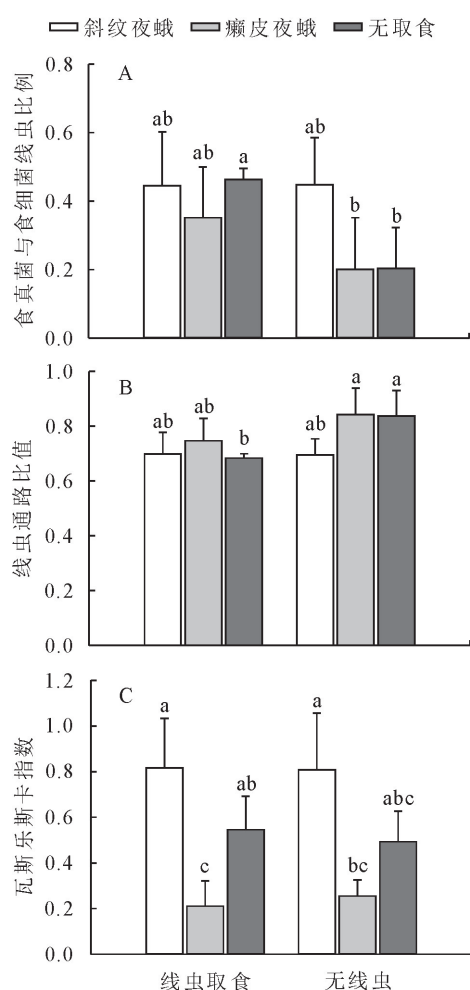


图4 地上-地下不同取食处理对土壤线虫群落生态功能指数的影响

Fig. 4 Effects of above-ground herbivory treatment on community ecological function indexes of soil nematodes

3.2.2 昆虫与根结线虫危害对线虫群落多样性的影响 地上害虫的类型(专食性、广食性)是影响地上和地下植食性生物互作结果的重要因素之一^[35,39]。本研究发现2种不同食性害虫取食对土壤线虫群落多样性产生了截然不同的影响:癭皮夜蛾取食显著降低了乌柏根际土壤线虫的群落多样

性,斜纹夜蛾取食则会显著增加土壤线虫的群落多样性。而刘满强等^[40]研究表明,褐飞虱(*Nilaparvata lugens*)对水稻根际土壤线虫的多样性指数没有明显影响。表明植食动物与土壤线虫群落的关系受到多种因素的交互影响。有研究表明,地上植食害虫可以通过调节植物碳资源分配、诱导根系分泌物释放等方式间接对土壤线虫群落产生影响^[41]。吴文涛等^[42]研究表明万寿菊的根系分泌物会对多种土壤线虫产生抑制作用。未来需要进一步探索各种取食处理对根系次生代谢产物、分泌物及化感物质的影响,以深入阐明其对土壤线虫的作用机制。

3.2.3 昆虫与根结线虫危害对线虫生态功能指数的影响 本研究所有处理的 NCR 指数均 >0.5 ,说明土壤有机质主要由细菌途径分解。南方根结线虫单独处理显著增大了 F/B 指数、减小 NCR 指数,表明根结线虫取食增强了土壤中养分周转速率较慢的真菌分解途径。所有处理的 WI 指数均小于1,表明矿化途径主要从植物到植食线虫,间接说明植物寄生线虫感染概率的增加^[32]。专食性地上害虫取食下的 WI 值显著低于广食性地上害虫取食,但 Liu 等^[6]的研究结果表明空心莲子草在专食性害虫处理下的 WI 值明显高于广食性害虫处理,这可能与不同食性地上害虫取食处理下引起的食微线虫及植物寄生线虫的丰度变化有关。

参考文献:

- [1] VAN DAM N M, WITJES L, SVATOŠ A. Interactions between aboveground and belowground induction of glucosinolates in two wild *Brassica* species[J]. New Phytologist, 2004, 161(3): 801-810.
- [2] 申思,郭文锋,覃海蓉,等. 根结线虫侵染对虾钳菜拔龟甲幼虫发育的影响[J]. 河南农业大学学报, 2021, 55(1): 52-6, 72.
- [3] BERNARD E C. Soil nematode biodiversity[J]. Biology and Fertility of Soils, 1992, 14(2): 99-103.
- [4] 王雪峰,毛之夏,徐济贵,等. 根际效应对大豆田土壤线虫群落组成及多样性的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(16): 5256-5262.
- [5] 刘佳. 植物入侵对土壤线虫群落的影响[D]. 武汉: 中国科学院大学(中国科学院武汉植物园), 2019: 11, 41-43.
- [6] LIU J, DAI S S, HUANG W, et al. Aboveground herbivory increases soil nematode abundance of an invasive plant[J]. Journal of Plant Ecology, 2020, 13(4): 405-412.
- [7] KAPLAN I, SARDANELLI S, DENNO R F. Field evidence for indirect interactions between foliar-feeding insect and root-feeding nematode communities on *Nicotiana tabacum*[J]. Ecological Entomology, 2009, 34(2): 262-270.
- [8] DE DEYN G B, VAN RUIJVEN J, RAAIJMAKERS C E, et al. Above- and belowground insect herbivores differentially affect soil nematode communities in species-rich plant communities[J]. Oikos, 2007, 116(6): 923-930.
- [9] ZHAO J, ZHAO C C, WAN S Z, et al. Soil nematode assem-

- blages in an acid soil as affected by lime application[J]. Nematology, 2015, 17(2): 179-191.
- [10] 张中峰, 黄玉清, 莫凌, 等. 岩溶区4种石山植物光合作用的光响应[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(1): 44-48.
ZHANG Z F, HUANG Y Q, M L, *et al.* Photosynthesis light response characteristics of four limestone plants in Karst area [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(1): 44-48. (in Chinese)
- [11] 郝清玉, 曹小林. 基于应力波技术对海南岛海防林抗风树种的筛选[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(2): 75-83.
HAO Q Y, CAO X L. Selection of wind-resistant tree species for coastal protection forests in Hainan Island based on stress wave technique[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(2): 75-83. (in Chinese)
- [12] 郑代平. 乌桕作为华北地区绿化树种的前景展望[J]. 河南林业科技, 2015, 35(2): 41-43.
- [13] PILE L S, WANG G G, STOVALL J P, *et al.* Mechanisms of Chinese tallow (*Triadica sebifera*) invasion and their management implications—a review [J]. Forest Ecology and Management, 2017, 404: 1-13.
- [14] 冯桂明, 刘厚超. 浅析乌桕的发展前景及丰产栽培技术[J]. 农村经济与科技, 2013, 24(11): 123-124.
- [15] 张家亮, 王毅, 丁建清. 乌桕害虫名录[J]. 中国森林病虫, 2015, 34(5): 25-35.
- [16] 黄金水, 陈云鹏. 癭皮夜蛾生物学及其防治试验[J]. 福建林业科技, 1987(1): 37-40.
- [17] 冯兴琴. 斜纹夜蛾的识别、发生及防控技术[J]. 农业科技与信息, 2019, 16(23): 27, 32.
- [18] MBALUTO C M, AHMAD E M, FU M, *et al.* The impact of *Spodoptera exigua* herbivory on *Meloidogyne incognita*-induced root responses depends on the nematodes' life cycle stages[J]. AoB Plants, 2020, 12(4): plaa029.
- [19] 刘亚珍, 覃志伟, 项瑶, 等. 天敌互作对乌桕生长及生物量的影响[J]. 西南林业大学学报, 2018, 38(1): 196-201.
- [20] 刘亚珍, 项瑶, 郭文锋, 等. 乌桕对南方根结线虫与地上不同食性昆虫互作的光合生理响应[J]. 植物保护, 2019, 45(6): 222-228.
- [21] 刘维志. 植物病原线虫学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 372-419.
- [22] JOHNSON S N, CLARK K E, HARTLEY S E, *et al.* Aboveground-belowground herbivore interactions: a meta-analysis[J]. Ecology, 2012, 93(10): 2208-2215.
- [23] 风春, 李刚, 修伟明, 等. 复合性状转基因棉花对土壤线虫多样性的影响[J]. 棉花学报, 2015, 27(3): 268-274.
- [24] LIANG W, LAVIAN I, STEINBERGER Y. Effect of agricultural management on nematode communities in a mediterranean agroecosystem[J]. J Nematol, 2001, 33(4): 208-213.
- [25] BONGERS T, FERRIS H. Nematode community structure as a bioindicator in environmental monitoring[J]. Trends in Ecology & Evolution, 1999, 14(6): 224-228.
- [26] FERRIS H, BONGERS T, DE GOEDE R G M. A framework for soil food web diagnostics: extension of the nematode faunal analysis concept[J]. Applied Soil Ecology, 2001, 18(1): 13-29.
- [27] 霍娜. 黄土高原典型植被生态系统土壤线虫群落的演变特征及驱动机制[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2021: 8-10.
- [28] YEATES G W. Variation in soil nematode diversity under pasture with soil and year[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1984, 16(2): 95-102.
- [29] INGHAM R E, ANDERSON R V, GOULD W D, *et al.* Vertical distribution of nematodes in a short grass prairie[J]. Pedobiologia, 1985, 28(3): 155-160.
- [30] BONGERS T, BONGERS M. Functional diversity of nematodes[J]. Applied Soil Ecology, 1998, 10(3): 239-251.
- [31] WASILEWSKA L. The effect of age of meadows on succession and diversity in soil nematode communities[J]. Pedobiologia, 1994, 38(1): 1-11.
- [32] 张杨. 不同放牧方式对松嫩草地土壤线虫群落特征的影响[D]. 长春: 东北师范大学, 2014: 29-30.
- [33] YEATES G W, BONGERS T, DE GOEDE R G M, *et al.* Feeding habits in soil nematode families and genera—an outline for soil ecologists[J]. J Nematol, 1993, 25(3): 315-331.
- [34] MEIER A R, HUNTER M D. Arbuscular mycorrhizal fungi mediate herbivore-induction of plant defenses differently above and belowground[J]. Oikos, 2018, 127(12): 1759-1775.
- [35] LI X Q, GAO X, SIEMANN E, *et al.* Effects of above- and belowground herbivory of specialists and generalists on the growth and defensive chemicals of introduced and native Chinese tallow seedlings[J]. Plant and Soil, 2020, 455: 65-78.
- [36] MACHADO R A R, ARCE C C M, MCCLURE M A, *et al.* Aboveground herbivory induced jasmonates disproportionately reduce plant reproductive potential by facilitating root nematode infestation[J]. Plant, Cell & Environment, 2018, 41(4): 797-808.
- [37] WARDLE D A, YEATES G W, WILLIAMSON W, *et al.* The response of a three trophic level soil food web to the identity and diversity of plant species and functional groups[J]. Oikos, 2003, 102(1): 45-56.
- [38] INGHAM R E, DETLING J K. Plant-herbivore interactions in a North American mixed-grass prairie[J]. Oecologia, 1984, 63(3): 307-313.
- [39] ALI J G, AGRAWAL A A. Specialist versus generalist insect herbivores and plant defense[J]. Trends in Plant Science, 2012, 17(5): 293-302.
- [40] 刘满强, 黄菁华, 陈小云, 等. 地上部植食者褐飞虱对不同水稻品种土壤线虫群落的影响[J]. 生物多样性, 2009, 17(5): 431-439.
- [41] WONDAFRASH M, VAN DAM N M, TYTGAT T O G. Plant systemic induced responses mediate interactions between root parasitic nematodes and aboveground herbivorous insects[J]. Frontiers in Plant Science, 2013, 4: 87.
- [42] 吴文涛, 董莹, 王晓强, 等. 万寿菊-烟草轮作对土壤线虫群落的影响[J]. 西南农业学报, 2019, 32(2): 342-348.