

四种草原植物根际土壤线虫群落特征*

徐冰 任慧琴 赵念席** 阮维斌 高玉葆

(南开大学生命科学学院, 天津 300071)

摘要 植物是否能特异性地影响土壤生物群落逐渐受到生态学家的关注。本研究利用盆栽实验研究了内蒙古典型草原区3种建群种(大针茅、克氏针茅和羊草)和1种群落伴生种(冰草)根际土壤线虫群落的数量特征。结果表明:4种植物根际土壤线虫群落间差异显著,这不仅表现在线虫密度方面,也表现在线虫种属组成、营养类群比例、优势类群以及群落结构方面,其中冰草根际土壤线虫群落的成熟度指数最低;判别分析能够将同一种植物根际土壤线虫群落样品与其他种植物根际线虫群落样品很好地分开;聚类分析显示,大针茅和克氏针茅根际线虫群落首先聚在一起,后与冰草根际线虫群落聚在一起,最后与羊草根际线虫群落聚在一起,与这4种植物的系统关系一致。

关键词 物种特异性影响; 多样性; 功能类群; 判别分析; 聚类分析

中图分类号 Q145 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2015)1-0175-07

Community analysis of soil nematodes associated with four grassland species in the Inner Mongolian steppe. XU Bing, REN Hui-qin, ZHAO Nian-xi**, RUAN Wei-bin, GAO Yu-bao (College of Life Science, Nankai University, Tianjin 300071, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(1): 175-181.

Abstract: There is growing interest in whether plant species composition can affect the composition of soil microbial communities or soil fauna communities. In the present study, the effects of three dominant grass species (*Stipa grandis*, *Stipa krylovii* and *Leymus chinensis*) and one companion species (*Agropyron cristatum*) on the composition and function of nematode communities were studied in a 10-month pot-experiment with soil from the Inner Mongolian steppe. Our results revealed the following patterns: (1) Nematode compositions, including abundance, diversity and trophic group structure, and nematode maturity index were significantly different among different plant species. Nematode maturity index was lowest in soil conditioned by *A. cristatum*. (2) Nematode communities could be separated by plant species identity by discriminant analysis. (3) Based on the similarity coefficients, the result of cluster analysis indicated that these samples were clustered into three subgroups: samples conditioned by *S. grandis* and *S. krylovii* as the first subgroup, then samples conditioned by *A. cristatum* as the second subgroup, samples conditioned by *L. chinensis* as the third subgroup. This ordination closely resembles the phylogenetic structure of the grasses that were used in this study.

Key words: species-specific effect; diversity; functional group; discriminant analysis; cluster analysis.

全球气候变化和人类活动正迅速地改变着陆地生态系统原有的自然过程,对陆地生态系统产生强烈的影响(Theurillat *et al.*, 2001; Garnier *et al.*, 2007),特别是在干旱-半干旱草原区,这种现象更加

明显。长期以来,研究者们或者只关注地下部亚系统或者只关注地上部亚系统对生态系统进程的影响,而忽略二者之间的联系。随着研究的逐渐深入,有关土壤食物链组分结构是由消费者和资源供给者(生产者)共同调节的研究逐渐增多(Morriën *et al.*, 2012; Hogenhout *et al.*, 2013),其中,由于不同植物的营养成分和分解速率等存在差异,提供给土壤的

* 国家自然科学基金项目(31270463和30900191)和国家基础学科人才培养基金项目(J1103503)资助。

** 通讯作者 E-mail: zhaonianxi@nankai.edu.cn

收稿日期: 2014-04-30 接受日期: 2014-08-26

资源质量也会不同,因此关于植物对土壤生物群落的特异性影响的研究逐渐展开。在土壤生物群落中,线虫是最重要的类群之一,具有数量大、种类多、对环境变化敏感、指示性强等特点;另外,线虫占据着土壤食物网中的多个营养级,参与了土壤中氮的循环和有机质分解两个关键生态过程,直接或间接地影响了植物群落结构和功能动态(Ekschmitt *et al.*, 2001; 李玉娟等, 2005; Sánchez-Moreno *et al.*, 2010)。因此,关于不同植物物种是否能特异性地影响根际线虫群落很早就受到了各国生态学家的关注。已有结果表明:在人工控制实验、自然或半自然生态系统中,土壤线虫群落的组成会对地上部植物群落或者植物种类的变化发生特异性的响应(Viketoft, 2007, 2008; Viketoft *et al.*, 2011; Eisenhauer *et al.*, 2011, 2013)。

中国北方草地面积近 $3.0 \times 10^8 \text{ hm}^2$, 约占全国草地总面积的 3/4, 对维持北方生态环境的质量起着重大作用。近半个世纪, 由于全球性的气候干旱变化以及人类活动的加剧, 已有 90% 的草原发生退化, 群落结构和功能发生了很大变化。对该区域主要植物地下部线虫群落的组成和结构进行分析, 并进行对比研究, 将对揭示土壤线虫在草原生态系统中的地位 and 作用提供新的依据, 为草原的合理利用和保护提供科学依据, 但相关研究并未展开。大针茅 (*Stipa grandis*)、克氏针茅 (*Stipa krylovii*)、羊草 (*Leymus chinensis*) 和冰草 (*Agropyron cristatum*) 是内蒙古草原区重要的植物物种, 均属于禾本科, 前 3 种植物是当地典型草原群落建群种和优势种, 对生物群落的结构和功能都具有重要的调节作用, 而冰草为典型草原群落的主要伴生种或者群落退化阶段的优势种。本研究通过人工控制盆栽实验来检测这 4 种禾本科植物根际土壤线虫群落组成的数量特征及成熟度指数等功能特征, 验证不同植物对线虫群落的功能多样性具有特异性影响。

1 材料与方法

1.1 实验设计

2011 年 7 月, 在内蒙古自治区锡林浩特市东南 40 km, 以大针茅-羊草为建群种的典型草原区(群落中克氏针茅和冰草的多度也较大)采集 0~15 cm 土壤, 土壤过 4 mm 筛去除植物残存根系并混匀, 取部分放入 -20 °C 保存, 其余的室温放置。2012 年 1 月, 对室温放置的土壤进行高温高压间歇灭菌处理

(张辉等, 2011), 经检测土壤中的细菌、真菌、放线菌和线虫均已被成功杀死。将上述混匀的灭菌土分装于 19×20 cm 的盆中, 每盆 2.5 kg 土壤。将刚刚发芽的大针茅、克氏针茅、冰草和羊草移栽至盆中进行单种, 每盆 4 株相同的植物, 每种植物 8 个重复, 另有 4 盆不种植任何植物, 共 36 盆。2012 年 1 月 25 日, 向上述的盆中加入 25 g 保存于 -20 °C 冰箱中的混匀土壤, 并浇少量水使微生物和线虫渗入, 作为盆栽土壤微生物和线虫的来源, 经检测此混匀土壤中含有多达 50 属线虫, 25 g 土壤中包括约 80 条线虫和未孵化的虫卵。在相同的条件下对所构建植物种群进行无胁迫培养(期间无施肥、农药处理), 人工去除杂草和害虫。2012 年 10 月收获植物, 并仔细收集根际土壤, 装入封口袋中, 于 -20 °C 储藏用于线虫的分离和鉴定。

1.2 土壤线虫分离和鉴定

利用淘洗-过筛-蔗糖梯度离心法分离线虫(Liang *et al.*, 1999)。在实体显微镜下观察, 并根据《中国土壤动物检索图鉴》(尹文英, 1998) 和《植物线虫分类学》(谢辉, 2005) 鉴定。统计每个样品中线虫的种类和数量, 并将线虫按营养类型分为植食性线虫、食细菌线虫、食真菌线虫、杂食-捕食性线虫 4 个功能类群(Yeates *et al.*, 1993)。分析土壤含水量, 最终将土壤中线虫的数量折算成每 100 g 干土中含有线虫的条数。

1.3 线虫多度的划分

本次实验中采用两种方法计算线虫多度。一是按不同种属划分, 计算各属个体数占总捕获量的多少。其中, 10% 以上者为优势类群, 1%~10% 为常见类群, 1% 以下为稀有类群。二是按不同营养类群划分, 分别计算食细菌类线虫、食真菌类线虫、植物寄生类线虫、杂食-捕食类线虫各占全部捕获线虫的比例。

1.4 数据分析

采用土壤线虫生态学者普遍采用的生物多样性指数来度量土壤线虫群落的多样性、均匀度和成熟度。

Shannon 多样性指数 (H'):

$$H' = - \sum P_i \ln P_i$$

Simpson 均匀度指数 (E):

$$E = D/S$$

$$D = 1/\sum P_i^2$$

式中, S 为所鉴定属的总数, P_i 为第*i*个属的线虫个体占捕获全部线虫的比例。

自由生活线虫的成熟度指数(maturity index, MI):

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

式中, $v(i)$ 为第*i*种线虫的*c-p*值(Bongers *et al.*, 1998), $f(i)$ 为第*i*种线虫的个体数量占自由生活线虫个体数的比例。

将所得数据输入电脑,进行如下分析:利用SPSS 19.0中单因素方差分析来分析土壤线虫群落不同植物根际土壤中是否存在显著差异;根据各个样品中各属线虫在百克干土中的数量,借助SPSS 19.0中的典范判别分析来研究土壤线虫的种属和多度与地上部植物的关系;为了分析植物间的关系以及植物根际土壤线虫群落的关系,一方面将植物根际线虫的有(无)用1(0)进行标记,利用Jaccard相似系数计算不同植物根际线虫群落的相似性系数并构建UPGMA聚类图;另一方面借助PhyloMatic程序来分析这4种植物的系统关系,此程序为Webb编写的在线程序,用户只需要输入相应格式的物种名录。

2 结果与分析

2.1 不同植物根际土壤线虫群落组成和结构特征

对不同植物根际土壤线虫进行统计,不同植物种根际线虫的种类和优势种类别都存在一定的差异。大针茅根际土壤样品中共得到21属线虫,优势类群为短体属和鞘属;克氏针茅根际土壤样品中共得到26属线虫,优势类群为短体属;冰草根际土壤样品中共得到29属线虫,优势类群为矮化属、短体属和长针属;羊草根际土壤中共得到21属线虫,优势类群为垫刃属、拱唇属和矛线属(表1)。4种植物根际线虫的稀有类群也存在一定差异:在总共捕获的35属线虫中,6属仅出现在冰草根际土壤中,2属仅出现在羊草根际土壤中,1属仅出现在大针茅根际土壤中。对照组土壤中,共得到16属线虫,优势类群为滑刃属、矮化属和短体属(表1)。

对不同植物根际土壤线虫比例和群落特征进行单因素方差分析,结果显示:每百克干土线虫数量及其所属属别数目在不同种植物根际土壤间差异显著,其中,冰草根际土壤中线虫数量最多(104.0条·100g⁻¹干土),大针茅根际土壤中线虫数量最

少(41.9条·100g⁻¹干土),冰草和克氏针茅根际土壤线虫数目显著高于大针茅根际土壤和对照土壤线虫数目;线虫营养类群的多度在不同种植物根际土壤间也差异显著,如羊草根际土壤线虫主要为杂食-捕食类(37.33%),显著高于其他3种植物根际此类线虫的比例,而其他3种植物根际线虫主要为植物寄生类线虫,显著高于羊草根际线虫比例(34.26%);线虫群落多样性指数表现在克氏针茅根际显著高于大针茅根际;线虫群落均匀度指数在大针茅根际显著高于冰草根际;自由生活线虫的成熟度指数在羊草根际土壤群落中显著高于其他3种植物,而在冰草根际土壤群落中显著低于其他3种植物(表2)。

将4种植物以盆为单位调查所得的根际土壤线虫的种类及数量进行整理(共32份调查结果),并进行判别分析。结果表明:前两个功能轴共解释总变异的93.3%,并将线虫群落按不同植物根际来源进行分类,准确率为90.6%(图1),表明不同植物根际土壤线虫群落具有特异性和专一性。

2.2 不同植物根际土壤线虫群落相似性

将不同植物根际土壤线虫属别的有无统计后进行Jaccard相似性计算,发现大针茅和克氏针茅根际线虫的属别最接近,相似性系数为0.778,其次是克氏针茅和冰草根际线虫,相似性系数为0.719,相似性系数最低的为冰草和羊草根际线虫属别之间的相似性系数,仅为0.515(表3),基于表3所得矩阵获得的聚类图,显示大针茅和克氏针茅根际土壤线虫最先聚为一类,后与冰草根际土壤线虫聚为一类,最

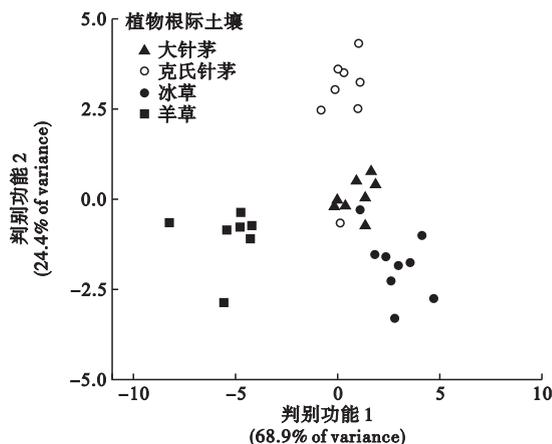


图1 4种植物根际土壤线虫群落数量特征的二维典范判别
Fig.1 Biplot of the first two canonical discriminant functions from analysis of quantitative characters of nematode communities from different plants' rhizosphere soil

表1 4种植物根际土壤线虫群落的组成、营养类群与c-p值

Table 1 Composition, trophic group and c-p values of soil nematode associated with four plant species

营养类群	属名	c-p 值	对照	大针茅	克氏针茅	冰草	羊草	
食细菌类线虫	小杆属 <i>Rhabaditis</i>	1	++	++	++	++	++	
	中杆属 <i>Mesorhabdites</i>	1	-	+	+	+	-	
	丽突属 <i>Acrobeles</i>	2	++	++	++	++	++	
	拟丽突属 <i>Acrobeloides</i>	2	-	-	-	+	-	
	头叶属 <i>Cephalobus</i>	2	++	++	++	+	-	
	真头叶属 <i>Eucephalobus</i>	2	-	++	++	+	-	
	板唇属 <i>Chiloplacus</i>	2	-	-	++	++	++	
	鹿角唇属 <i>Cervidellus</i>	2	++	++	+	++	+	
	高杯侧属 <i>Amphidelus</i>	4	-	-	-	+	-	
	无咽属 <i>Alaimus</i>	4	-	-	-	+	-	
食真菌类线虫	滑刃属 <i>Aphelenchoides</i>	2	+++	++	++	++	++	
	拟滑刃属 <i>Paraphelenchus</i>	2	++	++	++	++	++	
	垫咽属 <i>Tylencholaimus</i>	4	++	-	+	++	-	
	茎属 <i>Ditylenchus</i>	2	-	-	++	+	-	
	膜皮属 <i>Diphtherophora</i>	3	-	++	++	-	++	
	细齿属 <i>Leptonchus</i>	4	-	-	-	-	+	
植物寄生类线虫	矮化属 <i>Tylenchorhynchus</i>	2	+++	++	++	+++	++	
	短体属 <i>Pratylenchus</i>	3	+++	+++	+++	+++	++	
	针属 <i>Paratylenchus</i>	2	++	++	++	++	++	
	长针属 <i>Longidorus</i>	5	++	++	++	+++	++	
	垫刃属 <i>Psilenchus</i>	2	++	++	++	++	+++	
	鞘属 <i>Hemicycliophora</i>	3	-	+++	++	+	-	
	小环属 <i>Criconemella</i>	3	-	++	+	-	-	
	刺咽属 <i>Belonolaimus</i>	5	-	-	-	+	-	
	拟盘旋属 <i>Pararotylenchus</i>	3	-	-	+	+	++	
	拟毛刺属 <i>Paratrichodorus</i>	5	-	-	-	-	+	
	裸茅属 <i>Psilenchus</i>	2	-	+	-	-	-	
	杂食-捕食类线虫	单齿属 <i>Mononchus</i>	4	++	+	++	++	++
		拱唇属 <i>Labronema</i>	5	++	++	++	++	+++
矛线属 <i>Dorylaimus</i>		4	++	++	++	++	+++	
真矛线属 <i>Eudorylaimus</i>		5	-	++	++	+	++	
缢咽属 <i>Axonchium</i>		5	++	-	+	-	++	
盘咽属 <i>Discolaimus</i>		5	-	+	++	+	++	
孔咽属 <i>Aporcelaimus</i>		5	-	-	-	++	-	
锐咽属 <i>Carcharolaimus</i>		5	-	-	-	+	-	
总属数			16	21	26	29	21	

+++ 优势类群, ++ 常见类群, + 稀有类群, - 未出现。

表2 4种植物根际土壤线虫数量特征及其营养比例

Table 2 Characteristics of soil nematode communities with four different plant species

样地	线虫总数 (条·100 g ⁻¹ 干土)	属	食细菌类 线虫(%)	食真菌类 线虫(%)	植物寄生类 线虫(%)	杂食-捕食类 线虫(%)	多样性指数 (H)	均匀度指数 (E)	成熟度指数 (MI)
对照	36.2±8.4 b	11.50±3.50 bc	18.55±0.32 ab	24.08±3.08 a	45.08±1.08 b	13.22±4.05 c	2.23±0.26 ab	0.72±0.08 b	2.43±0.26 c
大针茅	41.9±7.3 b	12.80±1.02 b	19.82±2.05 ab	14.90±0.56 b	44.95±2.29 b	20.33±1.61 bc	2.19±0.15 b	0.89±0.04 a	2.92±0.05 b
克氏针茅	104.0±16.1 a	17.72±1.38 a	15.66±0.94 b	11.33±0.65 bc	49.52±3.03 ab	23.49±2.362 b	2.63±0.07 a	0.77±0.04 ab	3.14±0.05 b
冰草	122.1±22.3 a	15.89±1.14 ab	22.14±1.20 a	7.95±0.99 c	55.29±3.04 a	14.61±1.81 c	2.40±0.07 ab	0.55±0.06 c	2.62±0.08 c
羊草	78.7±11.2 ab	14.14±0.59 ab	18.70±1.44 ab	9.71±1.86 bc	34.26±1.76 c	37.33±2.29 a	2.43±0.04 ab	0.67±0.02 bc	3.51±0.06 a

数据为平均值±SE, 同列不同字母表示差异显著(P<0.05), 相同字母表示差异不显著(P>0.05)。

表 3 4种植物根际土壤线虫群落的 Jaccard 相似性
Table 3 Jaccard's similarity index of nematode community associated with four plant species

根际土壤来源	大针茅	克氏针茅	冰草	羊草
大针茅				
克氏针茅	0.778			
冰草	0.594	0.719		
羊草	0.593	0.679	0.515	

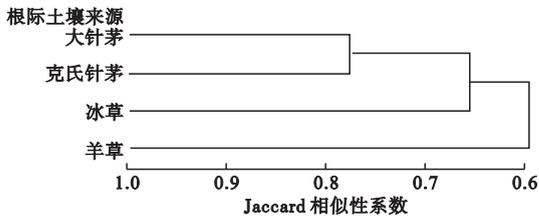


图 2 4种植物根际土壤线虫群落种属相似性聚类图
Fig.2 Dendrogram of Jaccard's similarity of nematode communities from different plants' rhizosphere soil

后与羊草根际土壤线虫聚在一起(图 2);与 Phylo-matic 程序给出的 4 种植物的系统关系一致(结果未列出)。

3 讨论

对地下生态系统的组成和功能以及驱动力的正确理解是当前生态学家面临的主要挑战。本研究以内蒙古典型草原区 4 种重要的禾本科草原植物根际土壤为研究对象,经过 10 个月的盆栽种植,土壤线虫群落的多个数量性状在这 4 种植物根际土壤间表现为差异显著,植物种类不仅影响土壤线虫群落的密度、种类,而且影响群落线虫结构和功能等指标(表 1 和表 2),表明即使是同为禾本科的植物,不同种植物生长一段时间后(本研究为 10 个月)也能引起土壤线虫群落的差异。Viketoft (2008) 经过 16 周的温室盆栽实验研究发现 6 种植物(禾本科的梯牧草(*Phleum pratense*)和羊茅(*Festuca ovina*),豆科的杂种车轴草(*Trifolium hybridum*)和白车轴草(*Trifolium repens*),杂类草的菊科锯草(*Achillea millefolium*)和蓼科的酸模(*Rumex acetosa*)对土壤线虫的丰富度和群落组成均有显著影响;土壤线虫组成的差异不仅存在于不同功能群间,在豆科两植物种间上也表现出显著差异,且这种差异随着时间的延长而更加显著。Bezemer 等(2010)研究表明,不同属的两植物种类对土壤生物群落的组成和结构具有特异性影响。植物特异性影响地下土壤线虫群落的原因,与群落地上部影响地下部的原因相似,可能为:

(1)与地上植物形态特征、植物组织化学组成的种间差异密切相关(Whitham *et al.*, 1999),如张建丽等(2012)研究发现,在相同的环境条件下,大针茅、羊草和糙隐子草植物叶片比叶面积、叶片 N 含量、净光合速率等指标之间均存在显著的差异。(2)与植物根性状(根系分泌物、根组织次生代谢物含量)的种间差异密切相关,因为地下线虫群落的可移动性与地上动物相比还是很慢的(Christensen *et al.*, 2007)。如张光辉等(2006)研究发现,羊草地下器官碳水化合物的含量显著高于大针茅,其果聚糖和淀粉含量分别是大针茅的 3.2 倍和 3.6 倍。本研究还发现:在无植物种植的对照土壤中,土壤线虫的数量、属数都最低,这主要是因为植物缺失,进而导致线虫群落资源质量和数量降低,影响植物寄生类线虫(植物寄生类线虫多度下降),进而影响土壤食物链、食物网等其他营养级,在 Viketoft (2008)的研究中也证实了这一点。

自由生活线虫的成熟度指数(MI)已经用于多种生态系统的研究,与线虫指示环境变化的敏感性直接相关(李玉娟等,2005);而且 MI 能直接反映线虫群落的演替状态,在草地生态系统中,土壤线虫群落的 MI 值高,土壤生态系统趋于稳定(Wasilewska, 1995)。本研究所选 4 种植物,除冰草为典型草原群落伴生种或者退化群落优势种外,其他 3 种均为典型草原建群种和优势种,冰草根际土壤线虫群落的 MI 显著低于其他 3 种植物,支持本文的科学假设。这一结果表明,MI 不仅在指示群落演替阶段或者受干扰程度方面有效,而且在反映单个物种在群落中的作用方面也具有一定的指示作用。

除线虫成熟度指数等这些反映土壤生态系统功能的指数用于土壤线虫分析外,Jaccard 相似系数计算并进行聚类分析以及判别分析等方法也常用来反映线虫组成上的变化(李玉娟等,2005)。本研究判别分析和 Jaccard 相似性计算的结果表明,虽然大针茅与克氏针茅这两种亲缘关系最近的植物其根际土壤线虫群落间差异显著(图 1),但群落线虫种类一致性在 4 个物种对中也最高(表 3)。聚类结果也显示,同为针茅属的两种植物根际土壤线虫群落最先聚在一起,后与亲缘关系较近的冰草的根际土壤线虫群落聚在一起,这一结果在某种程度上证明了地下部土壤线虫群落可能与地上部植物的进化关系之间存在一定的联系(Bezemer *et al.*, 2010)。许多研究结果表明,物种的功能特征在进化上是保守的

(Ackerly *et al.*, 1999; Chazdon *et al.*, 2003), 也就是说: 亲缘关系愈近的物种在生态学上就愈相似, 如: Gorman 等(2013) 研究发现, 亲缘关系越近的植物种, 其地下部土壤节肢动物群落组成也越相似; 王纳纳等(2014) 对内蒙古典型植物内生菌和土壤微生物群落结构的研究中发现: 细菌和真菌群落结构在一定程度上存在按物种聚类的现象, 以细菌较为明显。这些结果均表明, 地上部植物是决定地下生物群落的主要因子, 是土壤生物群落生长发育的驱动因子之一。但由于测定所有与生态系统过程相关的性状在现实中具有挑战性, 如: 早期关于植物系统关系与根际土壤线虫群落的关系的报道并不完全支持地上部植物的系统关系与土壤线虫群落之间具有相关性(Viketoft *et al.*, 2009), 因此在某些情况下能否用植物系统发育关系代替性状数据来确定所测定植物间性状的关系, 进而用于探讨群落构建和演化, 已经成为群落系统发育生态学(phylogenetic community ecology)的核心问题(Webb *et al.*, 2002)。

本研究证明了不同植物根际土壤线虫群落具有特异性, 且在某种程度上能够反映植物物种的系统发育关系和该物种在群落中的地位和作用, 这有助于我们理解生态系统地上部植物组成与地下部线虫群落的生态联系, 以及这种联系对生态系统进程的影响, 为全球变化及人类活动下生态系统的动态变化预测提供一定的科学依据。

参考文献

李玉娟, 吴纪华, 陈惠丽, 等. 2005. 线虫作为土壤健康指示生物的方法及应用. *应用生态学报*, **16**(8): 1541-1546.

王纳纳, 陈颖, 应娇妍, 等. 2014. 内蒙古草原典型植物对土壤微生物群落的影响. *植物生态学报*, **38**(2): 201-208.

谢辉. 2005. 植物线虫分类学. 北京: 高等教育出版社.

尹文英. 1998. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社.

张光辉, 李增嘉, 潘庆民, 等. 2006. 内蒙古典型草原羊草和大针茅地下器官中碳水化合物含量的季节性变化. *草业学报*, **15**(3): 42-49.

张辉, 张佳宝, 赵炳梓, 等. 2011. 高温高压间歇灭菌对中国典型土壤性质的影响. *土壤学报*, **48**(3): 540-548.

张建丽, 张丽红, 陈丽萍, 等. 2012. 不同管理方式对锡林郭勒大针茅典型草原退化群落的恢复作用. *中国草地学报*, **34**(6): 81-88.

Ackerly DD, Reich PB. 1999. Convergence and correlations among leaf size and function in seed plants: A comparative

test using independent contrasts. *American Journal of Botany*, **86**: 1272-1281.

Bezemer TM, Fountain MT, Barea JM, *et al.* 2010. Divergent composition but similar function of soil food webs of individual plants: Plant species and community effects. *Ecology*, **91**: 3027-3036.

Bongers T, Bongers M. 1998. Functional diversity of nematodes. *Applied Soil Ecology*, **10**: 239-251.

Chazdon RL, Careaga S, Webb C, *et al.* 2003. Community and phylogenetic structure of reproductive traits of woody species in wet tropical forests. *Ecological Monographs*, **73**: 331-348.

Christensen S, Alpei J, Vestergård M, *et al.* 2007. Nematode migration and nutrient diffusion between vetch and barley material in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, **39**: 1410-1417.

Eisenhauer N, Dobies T, Cesarz S, *et al.* 2013. Plant diversity effects on soil food webs are stronger than those of elevated CO₂ and N deposition in a long-term grassland experiment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **110**: 6889-6894.

Eisenhauer N, Migunova VD, Ackermann M, *et al.* 2011. Changes in plant species richness induce functional shifts in soil nematode communities in experimental grassland. *PLoS ONE*, **6**: e24087. doi:10.1371/journal.pone.0024087.

Ekschmitt K, Bakonyi G, Bongers M, *et al.* 2001. Nematode community structure as indicator of soil functioning in European grassland soils. *European Journal of Soil Biology*, **37**: 263-268.

Garnier E, Lavorel S, Ansquer *et al.* 2007. Assessing the effects of land-use change on plant traits, communities and ecosystem functioning in grasslands: A standardized methodology and lessons from an application to 11 European sites. *Annals of Botany*, **99**: 967-985.

Gorman CE, Read QD, Van Nuland ME, *et al.* 2013. Species identity influences belowground arthropod assemblages via functional traits. *AoB Plants*, **5**: plt049. doi:10.1093/aob-pla/plt049

Hogenhout S, Mitchum M, Smant G. 2013. Focus on molecular plant-nematode and plant-insect interactions. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, **26**: 8.

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

Morriën E, Duyts H, van der Putten WH. 2012. Effects of native and exotic range-expanding plant species on taxonomic and functional composition of nematodes in the soil food web. *Oikos*, **121**: 181-190.

Sánchez-Moreno S, Jiménez L, Alonso-Prados JL, *et al.* 2010.

- Nematodes as indicators of fumigant effects on soil food webs in strawberry crops in Southern Spain. *Ecological Indicators*, **10**: 148–156.
- Theurillat JP, Guisan A. 2001. Potential impact of climate change on vegetation in the European Alps; A review. *Climate Change*, **50**: 77–109.
- Viketoft M, Bengtsson J, Sohlenius B, *et al.* 2009. Long-term effects of plant diversity and composition on soil nematode communities in model grasslands. *Ecology*, **90**: 90–99.
- Viketoft M, Sohlenius B. 2011. Soil nematode populations in a grassland plant diversity experiment run for seven years. *Applied Soil Ecology*, **48**: 174–184.
- Viketoft M. 2007. Plant induced spatial distribution of nematodes in a semi-natural grassland. *Nematology*, **9**: 131–142.
- Viketoft M. 2008. Effects of six grassland plant species on soil nematodes; A glasshouse experiment. *Soil Biology and Biochemistry*, **40**: 906–915.
- Wasilewska L. 1995. Maturity and diversity of nematodes vs. long-term succession after stress. *Nematologica*, **41**: 353.
- Webb CO, Ackerly DD, McPeck MA, *et al.* 2002. Phylogenies and community ecology. *Annual Review of Ecology and Systematics*, **33**: 475–505.
- Whitham TG, Martinsen GD, Keim P, *et al.* 1999. Plant hybrid zones affect biodiversity; Tools for a genetic-based understanding of community structure. *Ecology*, **80**: 416–428.
- Yeates GW, Bongers T, De Goede RGM, *et al.* 1993. Feeding habits in soil nematode families and genera; An outline for soil ecologists. *Journal of Nematology*, **25**: 315–331.
-
- 作者简介** 徐冰,女,1990年生,硕士研究生,主要从事植物生态学研究。E-mail: xubing90@163.com
责任编辑 魏中青
-