

科尔沁沙地流动沙丘土壤线虫群落组成与多样性研究^①

张晓珂¹, 董锡文^{1,2}, 梁文举^{1*}, 蒋德明¹, 姜思维¹

(1 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳——110016; 2 佳木斯大学生命科学学院, 新疆黑龙江佳木斯——154007)

摘要: 本文对科尔沁沙地流动沙丘不同坡位(丘间地、过渡带、迎风坡中部、坡顶、背风坡上部和下部)和不同土层深度(0~20、20~40和40~60 cm)的土壤线虫群落组成与多样性进行了比较研究。研究表明,流动沙丘土壤线虫具有显著的坡位效应,而垂直分布特征不显著。丘间地和背风坡下部具有较高数量和较多种类的土壤线虫,而过渡带和迎风坡中部土壤线虫数量较低、种类也较少。不同坡位土壤线虫总数、食细菌线虫、食真菌线虫和植物寄生线虫数量存在显著差异。除食细菌线虫外,不同土层土壤线虫总数及其各营养类群均无显著差异。土壤含水量和电导率是影响土壤线虫群落空间分布格局的主要因素。土壤线虫群落分布格局的变化反映了流动沙丘土壤微环境的变化,对土壤质量具有一定的指示作用。

关键词: 流动沙丘; 土壤线虫群落; 多样性; 坡位

中图分类号: S154

土壤动物是生态系统中不可分割的组成部分,它对生态系统物质循环、能量流动、土壤结构改善均具有重要的作用。土壤动物—线虫在食物网中占据较为重要的位置,在土壤养分循环过程中发挥着重要的作用,它是土壤指示生物中的典型代表^[1-2]。许多物种的形态或生命特征与其生境特点之间表现出很强的关联性^[3],土壤线虫的营养类群多样,通过对它的形态学特征和捕食习性的分析可以获得许多有关其周围环境变化的大量信息^[4],这是土壤线虫作为指示生物的最重要特征之一。许多研究表明,土壤线虫反映了诸如土壤质量^[5]、生态演替^[6]、陆地生境特征^[7]、土地利用变化^[8-9]和重金属胁迫^[10-11]等诸多土壤环境的变化。

——科尔沁沙地地处半干旱农牧交错带,由于长期气候干旱等自然因素和过度放牧等人为因素的影响,沙化问题严重。科尔沁沙地中沙丘景观的出现是荒漠化发展的直接表现。流动沙丘是科尔沁沙地的主要景观类型之一,是沙地植被退化的极点,其特点是植被覆盖度极低、风蚀严重、土壤极度贫瘠且基质极不稳定^[12]。流动沙丘沙地生态系统也是一个结构简单和易受干扰的十分脆弱的生态系统。对于处在干旱、半干旱地区的科尔沁沙地,在沙地景观变化过程中,流动沙丘斑块起着最重要的作用,对流动沙丘的动态与沙漠化的关系进行分析,是揭示沙地景观动态变化和

化演变的基础^[13]。

对于沙丘生态系统的研究大多集中在植被格局^[14-15]、植被演替^[16]、土壤养分、微生物量、酶活性^[17-18]和水文条件^[19]等方面,而对于流动沙丘生态系统土壤动物特别是土壤线虫群落结构特征方面的研究报道相对较少。本文以科尔沁沙地土壤线虫群落为研究对象,对流动沙丘不同坡位和不同深度的土壤线虫群落结构特征进行分析,确定流动沙丘土壤线虫群落组成及多样性的空间变化特征,分析流动沙丘土壤环境对土壤线虫群落的影响,旨在为流动沙丘生态系统的荒漠化治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究地区概况

本研究在位于科尔沁沙地西部内蒙古赤峰市翁牛特旗的中国科学院沈阳应用生态研究所乌兰敖都荒漠化试验站(42°29'~43°06' N, 119°39'~120°02' E)进行。该地区年平均温度 5.1℃,年平均降水 340 mm,年平均风速 4.4 m/s,大多数时间风向为西北方向^[20]。

^①基金项目:国家自然科学基金(30700109)和中国博士后科学基金(20070421071)资助。

* 通讯作者(liangwj@iae.ac.cn)

作者简介:张晓珂(1978—),女,辽宁沈阳人,博士后,主要从事土壤线虫生态学研究。

^①基金项目:国家自然科学基金项目(30700109)和中国博士后科学基金项目(20070421071)资助。

* 通讯作者(liangwj@iae.ac.cn)

作者简介:张晓珂(1978—),女,辽宁沈阳人,博士后,主要从事土壤线虫生态学研究。E-mail: zxk@iae.ac.cn

1.2 研究方法

1.2.1 取样方法 于 2006 年 10 月 19 日在试验站内选取典型的流动沙丘 (43°00' N, 119°38' E), 按照丘间地、过渡带、迎风坡中部、坡顶、背风坡上部和背

风坡下部这 6 个部位和 0~20、20~40 和 40~60 cm 这 3 个土层分别取样。分别设 4 条样带 (即 4 次重复), 每个样带间隔 10 m, 这一样带从丘间地贯穿至背风坡; 在每条样带上的每个部位均设 1 个 5 m × 5 m 的样方, 每个样方内取 5 钻, 将这 5 钻土样充分混合为一个土样, 用于测定分析。

1.2.2 土壤线虫的测定方法 将用筒钻取到的土壤样品混匀, 并装入密封的塑料袋中, 封口后带回实验室, 用于线虫的分离、提取和鉴定。测定前放置于 4℃ 冰箱冷藏保存。从 200 g 新鲜土样中利用改良的浅盘法^[21]对土壤线虫进行分离提取。线虫总数通过解剖镜直接计数, 最终折算成 100 g 干土中土壤线虫的数量。随机抽取 100 条线虫 (不足 100 条的处理全量鉴定, 结果折算为 100 条后进行比较) 在光学显微镜下进行科属鉴定。根据线虫的取食习性和食道特征可将其划分为 4 个营养类群: 食细菌线虫 (Bacterivores, BF)、食真菌线虫 (Fungivores, FF)、植物寄生线虫 (Plant parasites, PP) 和捕食/杂食线虫 (Omnivores-predators, OP)^[22-23]。土壤线虫的分类鉴定参照 Bongers^[24]的分类图鉴进行。

1.2.3 土壤理化指标的测定方法 土壤总有机碳 (TOC) 采用 TOC-5000A 全 C 分析仪测定; 土壤全 N 采用开氏定 N 法测定; 土壤含水量采用烘干法测定;

土壤 pH 采用电位法 (土水比 1:2.5) 测定; 电导率 (EC) 采用电导率仪 (土水比 1:5) 测定^[25]。

1.3 分析方法

线虫生态指数按以下公式进行计算: ①多样性指

数 (Diversity index) $H' = -\sum P_i (\ln P_i)$; ②优势度指数 (Dominance index) $\lambda = \sum P_i^2$; ③均匀度 (Evenness) $J' = H' / \ln S$; ④自由生活线虫成熟度指数 (Maturity index) $MI = \sum v(i) \times f(i)$; ⑤物种丰富度 (Species richness) $SR = (S-1) / \ln N$ 。公式中 P_i 为第 i 个分类单元中个体所占的比例; S 是所鉴定属的数量; $f(i)$ 是第 i 个属在线虫群落中所占的比重, $v(i)$ 为在生态演替中根据土壤线虫群落组成属于 k 选择和 r 选择的科属线虫分别赋予 cp 值为 1~5; N 是线虫的数量^[6, 26]。

线虫数据进行 $\ln(x+1)$ 转化后采用 SPSS 11.0 软件进行统计分析, 二因素方差分析用于分析坡位和土层深度对土壤理化性质和土壤线虫群落的影响, Spearman 相关性分析用于分析土壤线虫群落和土壤理化指标的相关关系。

2 结果与分析

2.1 流动沙丘土壤理化性质的变化

流动沙丘不同坡位和土层土壤理化性质结果见表 1。由表 1 可以看出在流动沙丘不同坡位土壤养分含量的变化表现为: 土壤总有机 C 和全 N 含量在丘间地的 40~60 cm 土层最高, 而最低值分别出现在背风坡上部的 0~20 cm 和 20~40 cm 土层。土壤含水量的最高值出现在丘间地的 40~60 cm 土层, 最低值出现在背风坡下部的 40~60 cm 土层。在流动沙丘背风坡上部的 20~40 cm 土层土壤 pH 最高 (7.04), 其余各个部位的土壤 pH 均 < 7。电导率的最高值和最低值分别出现在丘间地和迎风坡中部的 0~20 cm 土层。土壤总有机 C、全 N 和土壤含水量随土层深度的增加而呈现增加的趋势, 而土壤电导率则随土层深度的增加而降低。二因素方差分析结果表明, 流动沙丘不同坡位 ($p < 0.01$) 和不同土层 ($p < 0.05$) 土壤全 N 含量、土壤含水量、pH 和电导率均具有显著差异; 土壤总有机 C 含量仅在不同坡位具有显著差异 ($p < 0.01$)。整体上看, 与其余各个坡位相比, 丘间地具有较高的土壤养分和较充足的含水量。

表 1 流动沙丘不同坡位和土层土壤理化性质

Table 1 Soil physico-chemical properties at different positions and soil depths along the active sand dune

深度	部位	总有机 C (g/kg)	全 N (g/kg)	含水量 (g/kg)	pH	电导率 ($\mu\text{s}/\text{cm}$)
0~20 cm	丘间地	1.60 ± 0.42	0.07 ± 0.01	0.7 ± 0.3	6.60 ± 0.13	109.33 ± 32.56
	过渡带	1.36 ± 0.03	0.03 ± 0.02	0.2 ± 0.1	6.91 ± 0.21	23.00 ± 14.24
	迎风坡中部	2.49 ± 0.80	0.03 ± 0.01	0.1 ± 0.1	6.68 ± 0.09	13.55 ± 2.05
	坡顶	2.42 ± 0.71	0.03 ± 0.02	0.1 ± 0.1	6.43 ± 0.05	17.63 ± 6.30

20~40 cm	背风坡上部	1.00 ± 0.34	0.02 ± 0.02	0.1 ± 0.1	6.95 ± 0.14	20.18 ± 3.09
	背风坡下部	1.51 ± 0.14	0.03 ± 0.02	0.1 ± 0.1	6.57 ± 0.03	25.65 ± 6.70
	丘间地	2.17 ± 0.47	0.10 ± 0.05	1.2 ± 0.7	6.70 ± 0.44	74.20 ± 28.71
	过渡带	1.40 ± 0.15	0.05 ± 0.02	0.2 ± 0.1	6.85 ± 0.06	16.38 ± 1.67
	迎风坡中部	2.85 ± 0.05	0.04 ± 0.02	0.2 ± 0.1	6.73 ± 0.11	14.98 ± 1.04
	坡顶	2.33 ± 0.70	0.03 ± 0.01	0.2 ± 0.0	6.56 ± 0.10	14.93 ± 3.40
40~60 cm	背风坡上部	1.07 ± 0.43	0.02 ± 0.01	0.2 ± 0.1	7.04 ± 0.25	17.28 ± 2.12
	背风坡下部	1.48 ± 0.16	0.03 ± 0.02	0.1 ± 0.1	6.52 ± 0.17	22.93 ± 4.19
	丘间地	2.88 ± 1.05	0.15 ± 0.05	1.6 ± 0.4	6.13 ± 0.53	58.58 ± 25.00
	过渡带	1.59 ± 0.37	0.04 ± 0.02	0.3 ± 0.1	6.84 ± 0.13	15.85 ± 2.24
	迎风坡中部	2.86 ± 0.12	0.06 ± 0.02	0.2 ± 0.0	6.65 ± 0.15	16.23 ± 2.32
	坡顶	1.97 ± 0.85	0.04 ± 0.01	0.2 ± 0.1	6.35 ± 0.33	15.10 ± 2.37
	背风坡上部	1.11 ± 0.61	0.03 ± 0.00	0.1 ± 0.0	6.91 ± 0.22	21.75 ± 6.89
	背风坡下部	1.50 ± 0.08	0.03 ± 0.02	0.1 ± 0.0	6.63 ± 0.03	20.25 ± 0.72

的变化表现为：土壤总有机 C 和全 N 含量在丘间地的 40 ~ 60 cm 土层最高，而最低值分别出现在背风坡上部的 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层。土壤含水量的最高值出现在丘间地的 40 ~ 60 cm 土层，最低值出现在背风坡下部的 40 ~ 60 cm 土层。在流动沙丘背风坡上部的 20 ~ 40 cm 土层土壤 pH 最高 (7.04)，其余各个部位的土壤 pH 均 < 7。电导率的最高值和最低值分别出现在丘间地和迎风坡中部的 0 ~ 20 cm 土层。土壤总有机 C、全 N 和土壤含水量随土层深度的增加而呈现增加的趋势，而土壤电导率则随土层深度的增加而降低。二因素方差分析结果表明，流动沙丘不同坡位 ($p < 0.01$) 和不同土层 ($p < 0.05$) 土壤全 N 含量、土壤含水量、pH 和电导率均具有显著差异；土壤总有机 C 含量仅在不同坡位具有显著差异 ($p < 0.01$)。整体上看，与其余各个坡位相比，丘间地具有较高的土壤养分和较充足的含水量。

2.2 流动沙丘土壤线虫总数

由图 1 可以看出流动沙丘土壤线虫总数的最高值出现在丘间地的 0 ~ 20 cm 土层 (平均值为 56 条/100 g 干土)，最低值出现在迎风坡的 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层 (平均值为 2 条/100 g 干土)。在 0 ~ 40 cm 土层中，土壤线虫总数在迎风坡最少，丘间地最多；在 40 ~ 60 cm 土层土壤线虫总数在迎风坡最少，过渡带最多。随着土层加深逐渐表现为迎风坡和背风坡的坡脚土壤线虫数量高于坡上和坡顶。统计分析结果表明，

坡土壤线虫总数显著低于背风坡下部，土壤线虫总数在不同土层不具有显著差异。

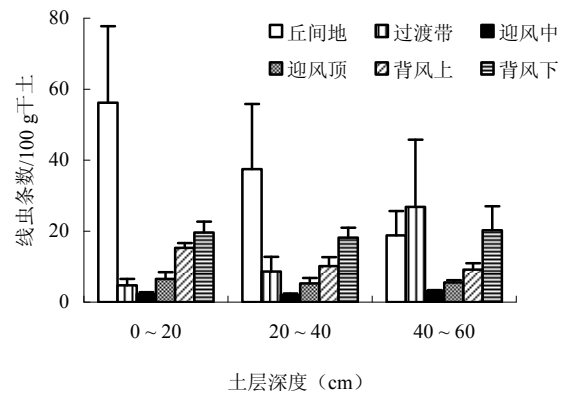


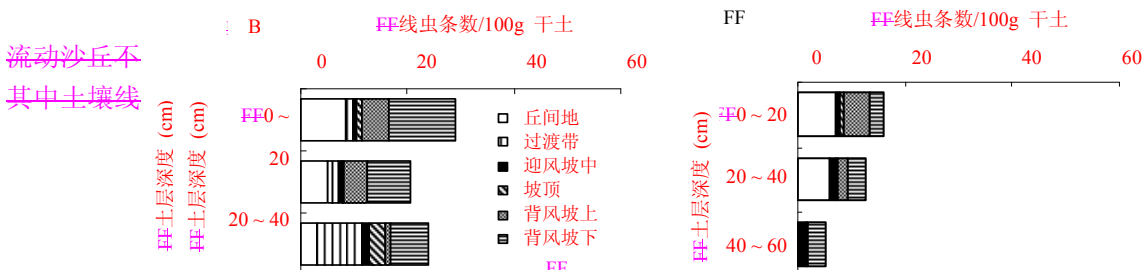
图 1 流动沙丘不同部位和土层土壤线虫总数

Fig. 1 Numbers of total totality of nematodes at different positions and soil depths along the active sand dune

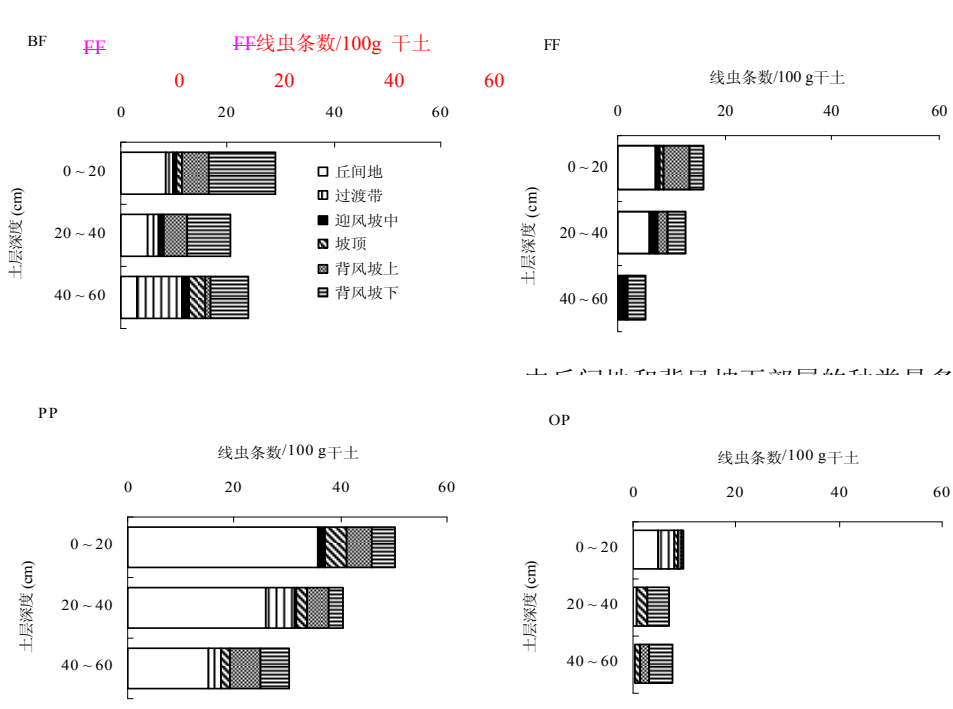
流动沙丘不同坡位土壤线虫总数差异显著 ($p < 0.01$)，其中土壤线虫数量在丘间地显著高于其他部位，迎风坡土壤线虫总数显著低于背风坡下部；土壤线虫总数在不同土层不具有显著差异。

2.3 流动沙丘土壤线虫营养类群

由图 2 可以看出各土层食细菌线虫和捕食杂食线虫的丰富度为 0 ~ 20 cm > 40 ~ 60 cm > 20 ~ 40 cm，食真菌线虫和植物寄生性线虫表现为随着土层的加深



土壤深度 (cm)



食细菌在背风坡下层，食细菌最少。食真菌在丘间地和过渡带最高，在背风坡下最低，最高值出现在背风坡下层的 20~60 cm 土层没有该营生。丘间地最高，杂食线虫存在。在 20~60 cm 土层食杂食线虫最少。

二因素

以及部位和土层的交互作用均对食细菌线虫的数量产生了显著影响；不同部位食真菌线虫和植物寄生线虫数量差异显著 ($p < 0.05$)，主要表现为丘间地食真菌

背、迎风坡中食杂食线虫

少 (表 2)，其

在丘间地和背风坡下层的种类数最多 (1 个)，而迎

风坡中是丘间地

各个部位均

有滑刃属和小矛属

滑刃属是迎

风坡中的属、滑刃属、

还包括丽突

属、轮属、拟毛刺属和小孔咽属的相对多度具有显著

差异。

表 2 流动沙丘不同坡位土壤线虫属的相对多度 (%)

Table 2 Relative abundance of nematode genera at different positions along the active sand dune

线虫属	线虫属拉丁名	丘间地	过渡带	迎风坡中部	坡顶	背风坡上部	背风坡下部
拟丽突属	<i>Acrobeloides</i>	2.8	10.9	10.4	13.9	13.5	16.9
丽突属	<i>Acrobeles</i>	4.5	6.1	26.1	7.1	13.8	24.9
无咽属	<i>Alaimus</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
鹿角唇属	<i>Cervidellus</i>	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	4.2
板唇属	<i>Chiloplacus</i>	0.9	0.0	0.0	0.0	0.5	2.2
异头叶属	<i>Heterocephalobus</i>	0.2	0.0	0.0	0.0	1.8	0.4
中杆属	<i>Mesorhabditis</i>	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4
饶线属	<i>Plectus</i>	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
棱咽属	<i>Prismatolaimus</i>	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
原杆属	<i>Protorhabditis</i>	0.8	9.1	0.0	0.0	0.0	0.9
畸头属	<i>Terocephalus</i>	7.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
威尔斯属	<i>Wilsonema</i>	0.0	16.7	0.0	0.0	0.0	0.5
真滑刃属	<i>Aphelenchus</i>	0.1	4.8	16.2	0.0	8.3	6.6
滑刃属	<i>Aphelenchoides</i>	0.3	0.0	18.2	7.3	12.6	4.1
瘤咽属	<i>Tylencholaimellus</i>	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
垫咽属	<i>Tylencholaimus</i>	8.1	0.0	4.0	1.1	3.1	3.8
丛垫刃属	<i>Atylenchus</i>	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
轮属	<i>Criconemoides</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	11.4	6.5
牙咽属	<i>Dorylaimellus</i>	0.0	0.0	0.0	1.8	0.0	1.2
丝尾垫刃属	<i>Filenchus</i>	9.4	2.4	6.1	14.4	19.0	5.8
居中属	<i>Geocenamus</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.0
螺旋属	<i>Helicotylenchus</i>	0.0	0.0	0.0	5.6	0.0	0.0
鞘属	<i>Hemicyclophora</i>	18.4	25.7	9.1	9.1	1.7	0.0
异皮属	<i>Heterodera</i>	0.0	0.0	4.5	5.6	0.0	0.5
针属	<i>Paratylenchus</i>	0.1	9.1	5.5	0.0	2.3	6.1
拟毛刺属	<i>Paratrichodorus</i>	35.1	0.0	0.0	4.4	0.0	0.0
短体属	<i>Pratylenchus</i>	0.0	3.0	0.0	3.7	3.0	0.4
小孔咽属	<i>Aprocelaimellus</i>	5.1	0.0	0.0	24.2	4.2	12.7
盘咽属	<i>Discolaimus</i>	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	0.4
上矛属	<i>Epidorylaimus</i>	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
小矛属	<i>Microdorylaimus</i>	0.4	12.1	0.0	0.0	3.6	1.5

风坡属的种类最少(8个)。鞘属和拟毛刺属是丘间地的优势属。除丘间地外,拟丽突属在其余各个部位均为优势属(相对丰富度>10%)。此外,鞘属和小矛属是过渡带的优势属;丽突属、真滑刃属和滑刃属是迎风坡中部的优势属;丝尾垫刃属和小孔咽属是坡顶的优势属;背风坡上部的优势属还包括丽突属、滑刃属、轮属和丝尾垫刃属;背风坡下部的优势属还包括丽突属和小孔咽属。统计分析结果表明,不同坡位的丽突属、轮属、拟毛刺属和小孔咽属的相对多度具有显著

差异。

2-52.5 流动沙丘土壤线虫生态指数

在流动沙丘,不同部位香农多样性指数(H')、优势度指数(λ)、成熟度指数(MI)、均匀度指数(J')、丰富度指数(SR)均具有显著差异($p<0.05$),不同土层的土壤线虫生态指数均不具有显著差异。整体上看,在流动沙丘的丘间地和背风坡下部具有较高的土壤线虫多样性、物种丰富度和较低的优势度和均匀度(表3)。

表3 流动沙丘土壤线虫生态指数

Table 3 Ecological indices of soil nematodes along the active sand dune

指数	土层 (cm)	丘间地	过渡带	迎风坡中部	坡顶	背风坡上部	背风坡下部
H'	0~20	1.51	0.44	0.41	0.74	1.47	1.59

	20~40	1.68	0.14	0.62	0.80	0.93	1.77
	40~60	1.15	0.17	0.35	0.75	0.81	2.15
λ	0~20	0.29	0.47	0.74	0.30	0.29	0.26
	20~40	0.26	0.66	0.33	0.63	0.50	0.22
	40~60	0.43	0.63	0.50	0.57	0.54	0.14
J'	0~20	0.77	0.98	0.93	0.94	0.95	0.82
	20~40	0.79	0.81	1.00	0.89	0.95	0.85
	40~60	0.66	1.00	1.00	0.98	0.98	0.89
MI	0~20	2.90	2.67	2.00	3.17	2.20	2.20
	20~40	3.23	2.00	2.22	4.02	2.10	2.81
	40~60	3.00	1.50	2.00	3.33	3.50	3.07
SR	0~20	1.47	1.34	0.90	1.33	2.09	1.92
	20~40	2.01	0.48	1.57	2.23	1.53	2.27
	40~60	1.32	0.48	1.44	1.23	1.84	3.03

2.6

2.6 流动沙丘土壤线虫与土壤理化性质的相关关系

流动沙丘土壤线虫数量和生态指数与土壤总有机 C、全 N、土壤含水量、pH 值、电导率的相关关系分析结果 (表 4) 表明, 电导率与线虫总数、食真菌线虫、植物寄生线虫、捕食杂食线虫数量、多样性指数

均具有显著的正相关关系, 而与土壤线虫的均匀度呈显著的负相关关系。总有机 C 与食真菌线虫数量之间、全 N 和土壤含水量与土壤线虫均匀度之间以及 pH 与成熟度指数之间显著负相关; 土壤含水量与线虫总数和植物寄生性线虫数量显著正相关 ($p < 0.01$)。均具有显著的正相关关系, 而与土壤线虫的均匀度呈

表 4 流动沙丘土壤线虫数量、生态指数与土壤理化性质相关关系

Table 4 Correlation between abundance and ecological indices of soil nematodes and soil factors

	总有机 C	全 N	含水量	pH	电导率
线虫总数	-0.196	0.193	0.321**	-0.110	0.517**
食细菌线虫	-0.224	-0.008	-0.009	0.030	0.062
食真菌线虫	-0.258*	0.085	0.092	-0.008	0.442**
植物寄生线虫	-0.022	0.237	0.407**	-0.159	0.502**
捕食杂食线虫	-0.211	0.026	0.041	-0.044	0.290*
H'	-0.132	0.133	0.154	-0.187	0.299*
λ	0.068	-0.050	-0.052	0.177	-0.144
J'	-0.079	-0.466**	-0.520**	0.245	-0.412**
MI	0.043	0.139	0.184	-0.272*	0.155
SR	-0.118	-0.025	-0.123	0.044	0.012

注: *, ** 分别代表 $p < 0.05$ 和 $p < 0.01$ 显著性。

显著的负相关关系。总有机 C 与食真菌线虫数量之间、全 N 和土壤含水量与土壤线虫均匀度之间以及 pH 与成熟度指数之间显著负相关; 土壤含水量与线虫总数和植物寄生性线虫数量显著正相关 ($p < 0.01$)。

3 讨 论

3.1 流动沙丘土壤线虫群落的空间分布格局

对流动沙丘不同坡位土壤线虫群落组成和多样性

的研究发现, 不同坡位土壤线虫的分布具有显著差异, 主要表现为丘间地和背风坡下部分布有较多数量和种类的线虫, 其次为背风坡的上部和坡顶, 而迎风坡和过渡带分布有较少数量和种类的线虫。风蚀和积沙是风力作用下沙丘的 2 个主要动态过程, 其中迎风坡和过渡带主要以风蚀过程为主, 背风坡下部 (落沙坡) 主要以积沙过程为主, 沙丘顶部是连接落沙坡和迎风坡的一个中间部位, 基本处于一种由弱风蚀到积沙的过渡特征^[27]。由此可以推论, 流动沙丘坡位的差异反

映了风蚀和积沙程度的分异,这种分异同时也影响了土壤线虫群落分布格局的变化。土壤线虫更易于生活在积沙部位而不是风蚀部位。在丘间地也分布有较高数量的土壤线虫,丘间地通常植被发育良好、地下水位接近地表且波动频繁,常被称为破碎化生境中的“生命岛”,在逆转生境破碎化、抑制盐碱化和促进土壤发育等方面具有重要意义^[28],因此其地貌特征和土壤特性比较适宜线虫的生长和繁殖^[29]。对流动沙丘不同土层深度(每层 20 cm 深)土壤线虫群落结构组成和多样性的研究发现不同土层土壤线虫的垂直分布变化幅度较小,仅食细菌线虫在不同土层深度具有显著差异,其余均无显著差异。因此,本研究中影响流动沙丘土壤线虫群落空间分布格局的主要是坡位,而不是土层的深度。

土壤线虫生态指数的分析结果表明,流动沙丘的丘间地和背风坡下部土壤线虫多样性和物种丰富度较高,但均匀度较低;过渡带和迎风坡中部则相反,多样性和物种丰富度较低,均匀度较高。常学礼等^[13]的研究表明在科尔沁沙地景观异质性的增强,是有利于沙漠化逆转(沙漠化程度降低);而同质性增强,则能使沙漠化程度增大。曹成有等^[30]认为生物多样性的提高会导致生态系统在功能上的优化并导致生态系统稳定性提高,当环境条件发生变化时,自身反应各不相同的物种种类的增加有利于生态系统稳定性的提高。由土壤线虫群落组成和多样性特征我们可以推论,过渡带和迎风坡是流动沙丘沙漠化较严重的部位,其生态系统稳定性较低,应作为流动沙丘治理的重点部位。

3.2 流动沙丘土壤性质对土壤线虫群落的影响

本研究主要对流动沙丘的土壤总有机 C、全 N、含水量、pH 和电导率这 5 个土壤因子产生的影响进行了分析,结果表明在土壤有机 C 和全 N 含量较低的流动沙丘,土壤 C、N 并不是影响土壤线虫群落的主要因素,而土壤含水量和电导率则是影响土壤线虫群落的主要土壤因子,二者与土壤线虫数量均具有显著的正相关关系。这一研究结果与在固定沙丘中获得的研究结果是不同的。对固定沙丘土壤线虫群落与土壤理化性质的研究表明^[29]总有机 C、全 N、含水量、pH 和电导率均是影响土壤线虫群落的主要土壤因子。因此可以看出,土壤环境不同的固定沙丘和流动沙丘对土壤线虫群落产生影响的主要因素也是不同的。电导率通常反映土壤中可溶性养分离子的水平。Liang 和 Steinberger^[31]对 Negev 沙漠中土壤线虫群落结构的研究表明,食真菌线虫和植物寄生线虫数量

与电导率正相关,我们的研究结果与此是一致的。在沙漠生态系统,水分是控制生物活性的主要因素之一^[32],本研究中土壤线虫总数与含水量正相关,也与 Liang 和 Steinberger^[31]的结果是相同的。

本研究中流动沙丘坡位和土层深度的不同是产生土壤理化性质不同的主要原因。在风蚀等自然因素的作用下,地形地貌特征的差异使土壤养分和水分在沙丘生态系统中分配不均,造成其空间分布的“富集”与“匮乏”现象^[20],水分和养分等的分配又间接影响了土壤线虫的分布,导致了土壤线虫群落形成了与流动沙丘坡位相关的分布格局。流动沙丘土壤线虫群落更多地受到了由于不同地形特征而形成的土壤微环境的影响。因此,线虫群落与沙地生态系统的稳定性密切相关,土壤线虫群落的变化可以反映出沙地土壤资源的异质性和土壤生态系统过程的差异^[29,33-34]。

总结上述结果,我们可以发现流动沙丘土壤线虫的空间格局分布具有显著的坡位效应,主要表现为土壤线虫的分布更趋向于丘间地和背风坡部位,丘间地和背风坡下部分布有较多种类的线虫,而过渡带和迎风坡中部较少。流动沙丘土壤含水量和电导率是影响土壤线虫群落分布的主要因子。土壤线虫群落组成与多样性的变化反映了流动沙丘土壤微环境的变化。

参考文献:

- [1] Wardle DA, Bardgett RD, Klironomos JN, Setälä H, van der Putten WH, Wall DH. Ecological linkages between aboveground and belowground biota. *Science*, 2004, 304: 1629-1633
- [2] Ritz K, Trudgill DL. Utility of nematode community analysis as an integrated measure of functional state of soils: Perspectives and challenge. *Plant and Soil*, 1999, 212(1): 1-11
- [3] Gaucherel C, Burel F, Baudry J. Multiscale and surface pattern analysis of the effect of landscape pattern on carabid beetles distribution. *Ecological Indicators*, 2007, 7: 598-609
- [4] Gupta VVSR, Yeates GW. Soil microfauna as bioindicators of soil health // Pankhurst CE, Doube BM, Gupta VVSR. *Biological Indicators of Soil Health*. Oxon, UK: CAB International, 1997: 201-233
- [5] Neher DA, Campbell CL. Nematode communities and microbial biomass in soils with annual and perennial crops. *Applied Soil Ecology*, 1994, 1: 17-28
- [6] Bongers T. The maturity index: An ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition. *Oecologia*, 1990, 83: 14-19
- [7] De Goede RGM, Bongers T. Nematode community structure in

- relation to soil and vegetation characteristics. *Applied Soil Ecology*, 1994, 1: 29-44
- [8] Ou W, Liang WJ, Jiang Y, Li Q, Wen DZ. Vertical distribution of soil nematodes under different land use types in an aquic brown soil. *Pedobiologia*, 2005, 49: 139-148
- [9] Hua JF, Jiang Y, Liang WJ. Effects of vegetation coverage on the spatial distribution of soil nematode trophic groups. *Frontiers of Biology in China*, 2008, 3: 63-67
- [10] Korthals GW, van de Ende A, van Megen H, Lexmond TM, Kammenga JE, Bongers T. Short-term effects of cadmium, copper, nickel and zinc on soil nematodes from different feeding and life-history strategy groups. *Applied Soil Ecology*, 1996, 4: 107-117
- [11] Zhang XK, Li Q, Wang SB, Jiang Y, Liang WJ. Effect of zinc addition to soil on nematode community structure. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2006, 76: 589-594
- [12] 曹成有, 滕晓慧, 崔振波, 姜勇, 梁文举. 植物固沙工程对土壤生物活性的影响. *辽宁工程技术大学学报*, 2006, 25(4): 606-609
- [13] 常学礼, 鲁春霞, 高玉葆, 毛爱华. 科尔沁沙地流动沙丘斑块动态与沙漠化关系. *自然灾害学报*, 2003, 12(3): 54-60
- [14] 陈玉福, 董鸣. 毛乌素沙地景观的植被与土壤特征空间格局及其相关分析. *植物生态学报*, 2001, 25(3): 265-269
- [15] 谢江波, 刘彤, 崔运河, 张元杭. 多尺度上的多物种格局——以莫索湾沙漠四种灌木及其生境为例. *生态学报*, 2008, 28(5): 2176-2190
- [16] 李玉霖, 孟庆涛, 赵学勇, 张铜会. 科尔沁沙地流动沙丘植被恢复过程中群落组成及植物多样性演变特征. *草业学报*, 2007, 16(6): 54-61
- [17] 曹成有, 朱丽辉, 蒋德明, 富徕, 高菲菲. 科尔沁沙地不同人工植物群落对土壤养分和生物活性的影响. *水土保持学报*, 2007, 21(1): 168-171
- [18] 郭轶瑞, 赵哈林, 左小安, 李玉霖, 黄迎新, 王少昆. 科尔沁沙地沙丘恢复过程中典型灌丛下结皮发育特征及表层土壤特性. *环境科学*, 2008, 29(4): 1027-1034
- [19] Zunzunegui M, Diaz Barradas MC, Aguilar F, Ain Lhout F, Clavijo A, Garcia Novo F. Growth response of *Halimium halimifolium* at four sites with different soil water availability regimes in two contrasted hydrological cycles. *Plant and Soil*, 2002, 247: 271-281
- [20] 蒋德明, 刘志民, 曹成有, 寇振武, 王汝楠. 科尔沁沙地荒漠化过程与生态恢复. 北京: 中国环境科学出版社, 2003
- [21] Verschoor BC, De Goede RGM. The nematode extraction efficiency of the Oostenbrink elutriator-cottonwool filter method with special reference to nematode body size and life strategy. *Nematology*, 2000, 2: 325-342
- [22] Yeates GW, Bongers T, De Goede RGM, Freckman DW, Georgieva SS. Feeding habits in nematode families and genera—an outline for soil ecologists. *Journal of Nematology*, 1993, 25: 315-331
- [23] Liang WJ, Lavian I, Pen-Mouratov S, Steinberger Y. Diversity and dynamics of soil free-living nematode populations in a Mediterranean agroecosystem. *Pedosphere*, 2005, 15: 204-215
- [24] Bongers T. *De Nematoden van Nederland*. Pirola, Schoorl, Netherlands: KNNV Bibliotheekuitgave 1988
- [25] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
- [26] Yeates GW, Bongers T. Nematode diversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1999, 74: 113-135
- [27] 姚洪林, 阎德仁, 胡小龙, 刘永军, 张化珍. 毛乌素沙地流动沙丘风蚀积沙规律研究. *内蒙古林业科技*, 2001, 1: 3-9
- [28] Grootjans AP, Ernst WHO, Stuyfzand PJ. European dune slacks: **S**trong interactions of biology, pedogenesis and hydrology. *Trends in Ecology and Evolution*, 1998, 13: 96-100
- [29] Zhang XK, Liang WJ, Jiang DM, Liu ZM, Jiang SW. Soil nematode community structure in a Chinese sand dune system. *Helminthologia*, 2007, 44: 204-209
- [30] 曹成有, 蒋德明, 骆永明, 寇振武. 小叶锦鸡儿防风固沙林稳定性研究. *生态学报*, 2004, 24(6): 1178-1186
- [31] Liang W, Steinberger Y. Temporal changes in nematode community structure in a desert ecosystem. *Journal of Arid Environments*, 2001, 48: 267-280
- [32] Noy-Meir I. Desert ecosystems: **H**igher trophic levels. *Annual Review of Ecological Systems*, 1974, 5: 195-214
- [33] Goralczyk K. Nematodes in a coastal dune succession: Indicators of soil properties? *Applied Soil Ecology*, 1998, 9: 465-469
- [34] Zhi DJ, Li HY, Nan WB. Nematode communities in the artificially vegetated belt with or without irrigation in the Tengger Desert, China. *European Journal of Soil Biology*, 2008, 44: 238-246

Along an Active Sand Dune in Horqin Sandy Land

ZHANG Xiao-ke¹, DONG Xi-wen^{1,2}, LIANG Wen-ju¹, JIANG De-ming¹, JIANG Si-wei¹

(1 *Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;*

2 *College of Life Sciences, Jiamusi University, Jiamusi, Xinjiang 154007, China)*

Abstract: Soil nematode community composition and diversity in six slope positions (lowland, ecotone, middle windward, top slope, and upper and lower leeward) and at three soil depths (0–20, 20–40 and 40–60 cm) along an active sand dune were studied in the Horqin Sandy Land. The results showed the significant effect of the slope position on soil nematode communities, but no of soil depth. The abundance and diversity of soil nematodes were higher in lowland and low leeward slope than in ecotone and middle windward slope. Significant differences in the abundances of total nematodes, bacterivores, fungivores, plant parasites and omnivores-predators were observed among slope positions. Only the abundance of bacterivores at different soil depths was significantly different. Soil moisture and electronic conductivity were the main factors which affected the spatial distribution pattern of soil nematode communities. The variation in soil microenvironment along an active sand dune could be reflected by the change in distribution pattern of soil nematode communities.

Key words: Active sand dune, Soil nematode communities, Diversity, Slope positions