

DOI: 10.20103/j.stxb.202402290419

周磊, 刘任涛, 曾飞越. 腾格里沙漠东南缘固沙植被区蚁丘对中小型土壤节肢动物群落的影响. 生态学报, 2024, 44(20): 9252-9263.

Zhou L., Liu R.T., Zeng F.Y. Effects of ant mound on soil meso-micro arthropod community in a revegetated area in the southeastern edge of Tengger Desert. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(20): 9252-9263.

腾格里沙漠东南缘固沙植被区蚁丘对中小型土壤节肢动物群落的影响

周磊^{1,3,4}, 刘任涛^{2,3,4,*}, 曾飞越^{2,3,4}

1 宁夏大学林业与草业学院, 银川 750021

2 宁夏大学生态环境学院, 银川 750021

3 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021

4 西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 银川 750021

摘要:为阐明固沙植被区中蚂蚁筑巢活动形成蚁丘对中小型土壤节肢动物群落的影响规律,于2022年在腾格里沙漠东南缘建植第5、8、34、57年的固沙植被区中,分别采集蚁丘内、外土壤样品,采用干漏斗法分离中小型土壤节肢动物,调查了固沙植被演替过程中蚁丘内外中小型土壤节肢动物群落组成、多样性分布特征及影响因素。结果显示:(1)中小型土壤动物的优势类群包括球角蜱属、等节蜱属和小真古螨科,分别从第8、34、57年开始呈现出蚁丘内显著高于蚁丘外的分布特征($P<0.05$)。中小型土壤节肢动物优势类群个体数及总个体数均从固沙植被建植第8年开始,蚁丘内显著高于蚁丘外($P<0.05$)。(2)中小型土壤动物群落类群数和 Shannon-Wiener 指数均表现为从固沙植被建植第34年开始,表现为蚁丘内显著高于蚁丘外($P<0.05$),而且34年固沙植被区蚁丘内分别是蚁丘外的1.6倍、2.2倍,57年固沙植被区蚁丘内分别是蚁丘外的2.3倍、3.9倍;均匀度指数仅在固沙57年呈现出蚁丘内显著高于蚁丘外($P<0.05$)的分布特征,即蚁丘内是蚁丘外的5.4倍。(3)结构方程模型显示,在固沙初期,土壤黏粒含量是影响中小型土壤节肢动物群落分布的主要环境因子,而在中后期则为土壤全氮和全钾含量。综合分析表明,腾格里沙漠东南缘固沙植被演替初期蚁丘仅增加中小型土壤节肢动物个体数,而只有在长期演替后蚁丘才表现为显著增加其个体数和多样性、直至改变群落组成结构,并对裸沙地中小型土壤节肢动物个体数分布具有重要辐射作用。

关键词:中小型土壤节肢动物;群落多样性;固沙植被区;生态系统演替;蚁丘;腾格里沙漠

Effects of ant mound on soil meso-micro arthropod community in a revegetated area in the southeastern edge of Tengger Desert

ZHOU Lei^{1,3,4}, LIU Rentao^{2,3,4,*}, ZENG Feiyue^{2,3,4}

1 College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2 College of Ecology and Environments, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

3 Key Lab. for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystems in Northwestern China of Ministry of Education, Yinchuan 750021, China

4 Breeding Base for State Key Lab. of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwestern China, Yinchuan 750021, China

Abstract: The objective of this study is to examine the effects of ant nesting activities on soil meso-micro arthropods communities in revegetated areas. Soil samples were collected from inside and outside of ant mounds in 5, 8, 34, and 57 years of revegetated areas in the southeastern edge of Tengger Desert. The soil meso-micro arthropods were extracted using the reformed Tullgren funnels. The community composition, and diversity distribution of soil meso-micro arthropods inside and outside of ant mounds and its influencing factors were examined alongside the succession of revegetated plantations. The results showed that: (1) The dominant groups of soil meso-micro arthropods include Isotoma, Hypogastrura, and Eupalopsellidae, which abundance were significantly higher inside than outside the ant mounds, since the 8th, 34th, and

基金项目:国家自然科学基金(32360318);宁夏自然科学基金创新群体项目(2023AAC01002);宁夏重点研发计划项目(2021BEG03007)

收稿日期:2024-02-29; **网络出版日期:**2024-07-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: nxliu2012@126.com

57th years of revegetated respectively. The abundance of dominant groups and total abundance of soil meso-micro arthropods were significantly higher ($P < 0.05$) inside than outside the ant mounds since 8 years of revegetated areas. (2) The group richness and Shannon-Wiener diversity were significantly higher ($P < 0.05$) inside than outside ant mounds in 34 and 57 years of revegetated areas, with values 1.6 and 2.3 times higher in 34 years of revegetated areas, and 2.2 and 3.9 times higher in 57 years of revegetated areas, respectively; The Pielou index of soil meso-micro arthropods communities was significantly higher ($P < 0.05$) inside than outside of ant mounds in 57 years of revegetated areas alone. (3) Soil clay content was the factor driving soil meso-micro arthropods communities at early stage of the succession of revegetated plantations, whereas it was soil total nitrogen and total potassium content served as the driving factors at the middle and late stages. In conclusion, there were facilitative effects of ant mounds on soil meso-micro arthropod abundance alone at early stage of the succession of revegetated plantations, whereas there were no significant facilitative effects on total abundance and diversity of soil meso-micro arthropods until long-term succession occurred. Where, even there was significant effect on community structure of soil meso-micro arthropods in the microhabitats between inside and outside of ant mounds; in the end there was a radiating effect of ant mounds on the abundant distribution of soil meso-micro arthropods in the microhabitats outside of ant mounds.

Key Words: soil meso-micro arthropod; community diversity; revegetated area; ecosystem succession; ant mound; Tengger Desert

20 世纪 50 年代以来,在我国北方风沙危害区建立大面积人工固沙植被^[1-2],目的是为了减轻沙尘暴危害和控制荒漠化发展,目前已成为荒漠区植被恢复和生态重建重要而有效的措施^[3]。随着固沙植被建群与演替,土壤结构和土壤养分逐渐改善,为地下土壤生物提供了更多的食物资源和更适宜的生存条件^[4-5],吸引地下土壤生物前来定居、活动和繁殖。蚂蚁是荒漠生态系统地下土壤生物的优势类群^[6],其筑巢和取食活动可以形成不同于周围环境的蚁丘微生境,是生态系统的工程师^[7]。蚂蚁筑巢活动亦是固沙植被区不可忽视的生物干扰因子^[8],并且适当的干扰可增加生物多样性和生态位复杂性^[9-10]。因而,研究荒漠生态系统固沙植被区蚂蚁筑巢活动形成蚁丘对地下土壤动物群落组成与生物多样性分布的影响规律,对于固沙植被区生物多样性恢复与维持及固沙植被建设与管理均具有重要意义。

关于蚂蚁筑巢活动形成蚁丘对土壤动物群落分布影响的研究,国内外开展的比较多。薛娟等^[11]在高寒草地中的研究发现蚁丘改变了中小型土壤节肢动物群落结构,并提高了其密度和多样性。冯怡琳等^[12]在戈壁荒漠中的研究发现蚁丘提高了大型土壤动物多样性,改变了其营养结构和功能。Almeida 等^[13]和 Boulton 等^[14]在温带草原中的研究发现一种收获蚁 (*Messor barbarus*) 的筑巢行为改变了螨类、跳虫和线虫的营养结构,并显著提升了小型节肢动物和线虫的丰度。研究表明,蚂蚁通过筑巢活动形成蚁丘微生境,产生的非生物和生物环境对中小型土壤节肢动物类群分布、生长产生深刻影响^[15-16],直接影响到群落组成与生物多样性分布。但是,在固沙植被区,关于蚂蚁筑巢活动形成蚁丘对中小型土壤节肢动物群落分布的影响研究,报道较少,特别是在固沙演替过程中,蚁丘微生境变化是否对中小型土壤节肢动物群落结构产生影响,尚未可知。

已有研究表明,在固沙植被演替过程中,植被和土壤环境改善均会影响蚂蚁群落组成、筑巢行为和蚁丘微生境^[17]。由于中小型土壤节肢动物具有繁殖速度快和世代周期短等特性,可对环境变化做出快速响应^[16, 18]。因而,随着固沙植被演替,蚂蚁筑巢活动形成的蚁丘微生境将对中小型土壤节肢动物的生存环境和食物资源造成影响,进而将影响中小型土壤节肢动物群落组成及多样性分布。并且,中小型土壤节肢动物既是消费者又是分解者,其生命活动在地下食物网中占据多个营养级,受多级环境因子的调控^[19]。所以,固沙植被演替过程中蚂蚁筑巢活动引起中小型土壤节肢动物群落结构的改变,将影响荒漠生态系统土壤物质循环、能量流动和食物网构成^[20-21],直接关系到固沙植被的生态效应与生态系统服务价值。

鉴于此,本研究以腾格里沙漠东南缘人工固沙植被区为研究对象,通过调查固沙植被演替过程中蚁丘内外中小型土壤节肢动物群落结构及多样性分布特征,结合土壤环境因子,阐明人工固沙植被区蚂蚁筑巢活动形成蚁丘对中小型土壤节肢动物群落结构的影响规律,旨在为荒漠生态系统生物多样性恢复与保护、固沙植

被建设与管理提供依据。

1 研究区概况

本研究选择腾格里沙漠东南缘人工固沙植被区为研究样地(32°27'N, 104°57'E),位于宁夏回族自治区中卫市沙坡头区“包-兰”铁路两侧。该区具有典型的大陆性气候和沙漠气候特征^[22],干旱、多风和风沙。年平均气温 9.6℃,最高 38.1℃,最低-25.7℃。平均风速 2.8m/s。年平均降水量约 186mm,80%集中在 5—9 月;潜在蒸发量 3000mm。土壤类型为风沙土。

为了防风固沙,保障“包-兰”铁路交通顺利通畅,20 世纪 50 年代以来在铁路两侧开展固沙植被建设,形成了“五代一体”固沙防风体系^[23]。近年来,在世界银行贷款项目中中卫防沙治沙项目的支持下,开始了固沙锁边植被生态建设工程。目前,该区域覆盖有不同建植年限的固沙植被区,形成了固沙植被演替序列样地,为试验提供了理想的试验平台。固沙植被区建设模式为:扎设 1m×1m 的麦草方格并种植柠条(*Caragana Korshinskii*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)和花棒(*Hedysarum scoparium*)等旱生灌木,以及后期补播的方式。固沙植被区植被分布情况如表 1。

表 1 不同固沙植被区植被分布概况

Table 1 Distribution of vegetation in different revegetated areas

年限/a Year	优势种 Dominant species	经度(E) Longitude	纬度(N) Latitude	海拔/m Elevation	坡位 Slope position
5	花棒(<i>H. scoparium</i>)、柠条(<i>C. Korshinskii</i>)、雾冰藜(<i>Grubovia dasyphylla</i>)	104°45'16"	37°28'36"	1639	坡底
8	花棒(<i>H. scoparium</i>)、柠条(<i>C. Korshinskii</i>)、砂蓝刺头(<i>Echinops gmelini</i>)、雾冰藜(<i>G. dasyphylla</i>)、沙鞭(<i>Psammochloa villosa</i>)	104°43'4"	37°26'15"	1703	坡底
34	花棒(<i>H. scoparium</i>)、柠条(<i>C. Korshinskii</i>)、油蒿(<i>A. ordosica</i>)、砂蓝刺头(<i>E. gmelini</i>)、蒙古虫实(<i>Corispermum mongolicum</i>)	104°47'10"	37°27'33"	1602	坡底
57	花棒(<i>H. scoparium</i>)、柠条(<i>C. Korshinskii</i>)、油蒿(<i>A. ordosica</i>)、驼绒藜(<i>Ceratoides latens</i>)、阿尔泰狗娃花(<i>Heteropappus altaicus</i>)、白草(<i>Pennisetum centrasiaticum</i>)	104°48'58"	37°27'10"	1591	坡底

2 研究方法

2.1 试验设计

于 2022 年 8 月,在腾格里沙漠东南缘人工固沙植被区,选择固沙年限 5a(建植于 2016 年)、8a(建植于 2013 年)、34a(建植于 1987 年)和 57a(建植于 1964 年)的固沙植被区为研究样地;各样地间距 2—4 km。在每个样地设置 10 个 30 m×30 m 的样区作为重复,每个重复样区间距 0.5—1 km。每个样区中随机选取 5 个大小相似的蚂蚁巢穴(均为活动蚁丘)为调查对象,以周围无蚂蚁干扰的非蚁丘裸沙地为对照,蚁丘与非蚁丘微生境相距 5 m。

2.2 土壤样品采集

在每个样区中,将 5 个蚁丘和非蚁丘土壤样品分别进行混合,采集到土壤混合样品各 1 个,带回实验室。一部分用于中小型土壤节肢动物分离,一部分用于土壤理化性质测定。共采集到混合土壤样品 80 个,即:2 微生境(蚁丘内外)×10 重复×4 固沙年限。

蚁丘土壤样品采集方法具体为:首先清除表面枯落物,以便暴露核心部分;然后使用小铲,快速采集蚁丘内容物,装入自封袋。非蚁丘对照土壤样品采集方法具体为:在邻近非蚁丘 5 m 处,采用相同小铲采集土壤样品,土壤深度 15 cm。分别将采集到蚁丘和非蚁丘土样混合后,装入自封袋进行标记。

2.3 中小型土壤节肢动物分离与鉴定

取混合土壤样品 200 g, 采用干漏斗 (Tullgren) 分离法分离中小型土壤节肢动物; 分离 48 h, 温度 25 ℃。将分离后的土壤动物标本保存于收集瓶中, 用于鉴定统计。中小型土壤节肢动物的分类鉴定, 主要依据《中国土壤动物检索图鉴》^[24]、《农业螨类学》^[25] 等文献。在体式镜 (Olympus SZX16, 日本) 和光学显微镜 (Nikon E200MV, 日本) 下, 将获取的土壤动物鉴定到属或科水平。

2.4 土壤理化性质测定

首先利用采集到的土壤样品测定土壤含水量, 然后将剩余土壤样品在自然状态进行风干, 过 2 mm 土壤筛去除植物根、枯枝落叶等杂质, 用于土壤 pH、电导率和土壤粒径以及土壤有机碳、全氮、全磷、全钾、有效磷和有效钾的测定。

具体测定方法为: 土壤含水率 (%) 利用烘干称重法, 即将土样置于 105 ℃ 烘箱中, 烘至恒重, 进行称重测定。土壤 pH 值 (1:2.5 土水比悬液) 采用 P4 多功能测定仪进行测定; 土壤电导率 (1:5 土水比浸提液; EC, $\mu\text{S}/\text{cm}$) 采用电导法进行测定。土壤有机碳 (SOC, g/kg) 采用重铬酸钾氧化—外加热法测定; 土壤全氮 (TN, g/kg) 采用凯氏定氮法 (Tecator AB, Sweden) 测定; 土壤全磷 (TP, g/kg) 采用酸溶—钼锑抗比色法测定; 土壤全钾 (TK, g/kg) 采用 NaOH 熔融—火焰光度计法测定; 土壤有效磷 (AP, mg/kg) 采用 NaHCO_3 浸提—钼锑抗比色法测定; 土壤有效钾 (AK, mg/kg) 采用醋酸铵—火焰光度计法测定^[26]。测定结果见参考文献^[17]。

2.5 数据分析与处理

统计不同调查样点中小型土壤节肢动物类群组成、个体数 (只/200g) 和类群数 (S), 在此基础上计算 Shannon-Wiener 指数 (H') 和均匀度指数 (E)。本研究采用类群数、Shannon-Wiener 指数 (H') 和均匀度指数 (E) 表征中小型土壤节肢动物群落多样性。依据中小型土壤节肢动物个体数占总个体数的百分比, 划分优势类群 ($\geq 10\%$)、常见类群 (1%—10%) 和稀有类群 ($\leq 1\%$)。

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

$$E = H' / \ln S$$

式中, P_i 为第 i 类群的个体数所占总个体数的百分比。

统计分析前, 首先对数据进行正态检验, 对不符合正态的数据进行 $\log(x + 1)$ 转换。采用主成分分析 (principal component analysis, PCA) 进行排序, 比较不同年限固沙植被区蚁丘内外中小型土壤节肢动物群落组成结构^[27] (基于中小型土壤节肢动物个体数进行计算); 考虑到 5a、8a、34a、57a 固沙植被区中小型土壤节肢动物群落 PC1 轴解释度分别为 34.03%、35.97%、37.10% 和 69.70%, 故其可以作为中小型土壤节肢动物群落结构的代表。采用独立样本 T 检验分析蚁丘内外中小型土壤节肢动物群落指数间差异性。采用线性回归法分析固沙植被演替过程中蚁丘内外中小型土壤节肢动物群落指数变化特征。采用 Pearson 相关性分析中小型土壤节肢动物优势类群与环境因子的关系。

采用 R 语言 piecewiseSEM 包构建分段结构方程模型 (piecewise structural equation modelling, pSEM) 分析中小型土壤节肢动物群落各项指标与环境因子之间的直接和间接影响。为减少模型参数的数量, 采用方差膨胀因子分析 (variance inflation factor, VIF) 除去具有多重共线性 ($VIF > 2$) 的土壤因子。采用 Z-score 转换法, 将丰富度、Shannon-Wiener 和均匀度指数合成为一个多样性指数。所有分析采用 R 4.3.0 软件。

3 结果与分析

3.1 中小型土壤节肢动物群落组成特征

本研究共采集中小型土壤节肢动物 2 纲 3 目 6 类 (属或科) (表 2)。其中, 优势类群包括球角蜱属 (*Hypogastrura*)、等节蜱属 (*Isotoma*) 和小真古螨科 (Eupalopsellidae), 其个体数分别占总捕获量的 37.34%、27.27% 和 22.73%; 常见类群包括垂盾甲螨科 (Scutoverticidae) 和腾岛螨科 (Teneriffiidae), 其个体数分别占总捕获量的 9.29% 和 1.92%; 稀有类群为金虻属 (*Tabanus*), 仅占总捕获量的 0.97%。

由表 3 可知, 优势类群的个体数在 8、34、57a 固沙植被区蚁丘内显著高于蚁丘外 ($P < 0.05$); 类群数在

表 2 不同固沙植被区蚁丘内外中小型土壤节肢动物群落组成
Table 2 Composition of soil meso-micro arthropods communities inside and outside ant mound in the different revegetated areas

类群 Group	5a		8a		34a		57a		总计 Total									
	蚁丘外 OA	蚁丘内 IA	蚁丘外 OA	蚁丘内 IA	蚁丘外 OA	蚁丘内 IA	蚁丘外 OA	蚁丘内 IA										
	个体数 占比%																	
垂盾甲螨科 <i>Scutoverticidae</i>																		
等节螨属 <i>Isotoma</i>	3	33.33	6	23.08	2	40	1	10	5	18.52	12	15.38	4	17.39	51	39.23	84	27.27
金蛇属 <i>Tabanus</i>	2	22.22	1	20													3	0.97
球角螨属 <i>Hypogastrura</i>	2	22.22	10	38.46	1	20	6	66.67	13	48.15	42	53.85	12	52.17	29	22.31	115	37.34
腾岛螨科 <i>Teneriffidae</i>	1	11.11									1	3.7			4	3.08	6	1.95
小真古螨科 <i>Eupalopsellidae</i>	1	11.11	10	38.46	1	20	3	33.33	8	29.63	24	30.77			23	17.69	70	22.73
总计 Total	9	100	26	100	5	100	10	100	26	100	79	100	23	100	130	100	308	100

OA: 蚁丘外 Outside ant mound; IA: 蚁丘内 Inside ant mound; Ind: 个体数 Number of individuals

表 3 不同固沙植被区蚁丘内外优势类群、常见类群和稀有类群变化特征
Table 3 Changes of the dominant, common and rare groups inside and outside ant mound in the different revegetated areas

类群 Group	5a		8a		34a		57a	
	蚁丘外 OA	蚁丘内 IA						
	个体数 类群数							
优势类群 Dominant group	0.60±0.22	1.10±0.39	0.40±0.20b	1.40±0.31a	2.60±0.79b	7.80±1.99a	1.70±0.50b	9.90±4.52a
常见类群 Common group	0.5±0.17	1.20±0.29	0.10±0.10	0.20±0.13	1.10±0.31b	2.00±0.15a	0.80±0.25b	1.80±0.29a
稀有类群 Rare group	0.10±0.10	0.10±0.10	0.10±0.10	0.10±0.10	0.10±0.10	0.10±0.10	0.60±0.40	2.3±1.19
类群数	0.20±0.20	0.10±0.10	0.10±0.10	0.10±0.10	0.10±0.10	0.10±0.10	0.5±0.16	0.2±0.13

同行不同字母表示蚁丘内外差异显著 ($P < 0.05$)

34、57a 固沙植被区蚁丘内显著高于蚁丘外 ($P < 0.05$)。但是常见类群和稀有类群的个体数和类群数在各固沙植被区蚁丘内外均无显著差异 ($P > 0.05$)。

3.2 中小型土壤节肢动物群落组成结构分布特征

排序分析 PCA 结果 (图 1) 表明, 在 5、8、34a 固沙植被区蚁丘内外中小型土壤节肢动物群落结构无明显差异, 表现为蚁丘内外微生境分布呈现交叉重叠现象; 但在 57a 固沙植被区, 蚁丘内外中小型土壤节肢动物群落结构差异显著, 表现为蚁丘内外微生境分布完全分开, 无任何交叉。沿着 PC1 轴分布的主要类群, 表现为在 8、57a 固沙植被区是等节蛭属, 而在 5、34a 固沙植被区是小真古蛭科; 沿着 PC2 轴分布的主要类群, 表现为在 5 和 8a 固沙植被区是球角蛭属, 在 34a 固沙植被区是腾岛蛭科, 在 57a 固沙植被区是小真古蛭科。

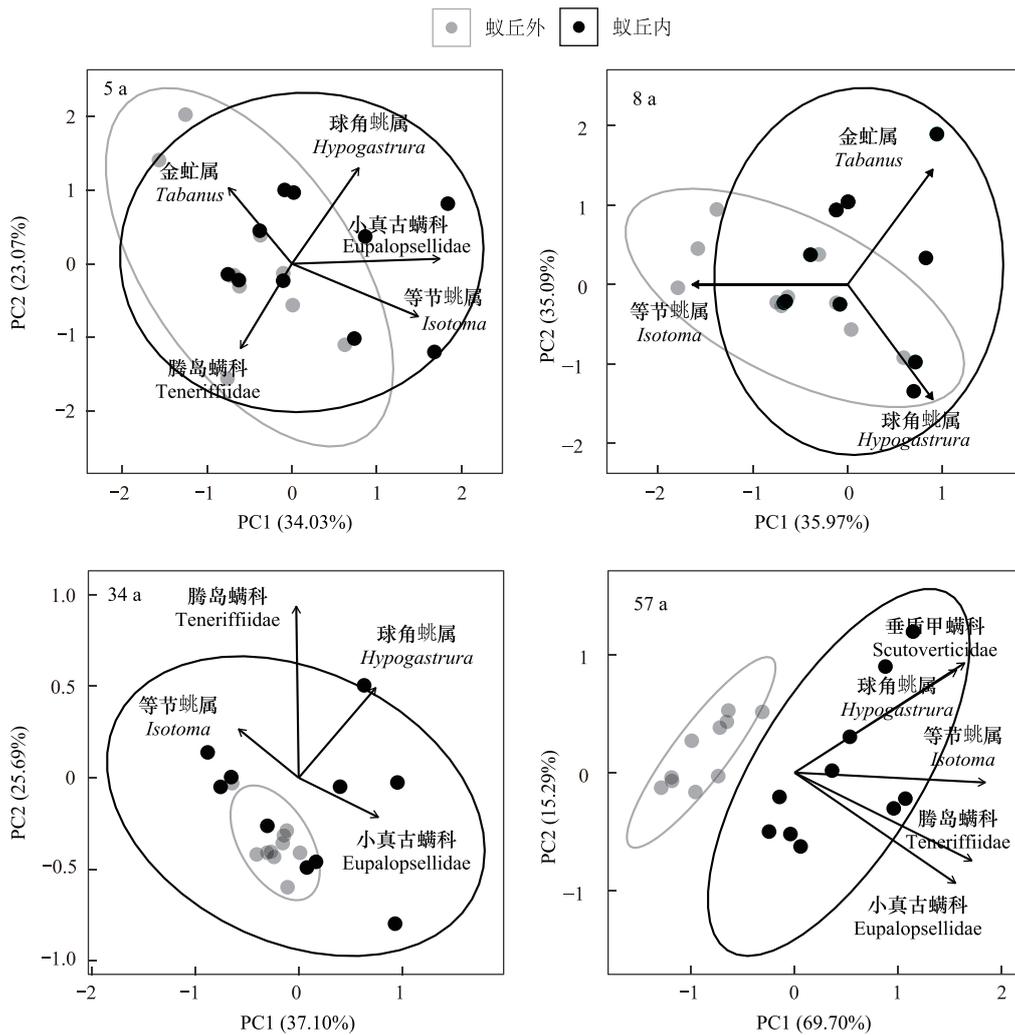


图 1 不同固沙植被区蚁丘内外中小型土壤节肢动物群落结构差异

Fig.1 Variations in community structure of soil meso-micro arthropods inside and outside ant mound in the different revegetated areas

PC: 主成分 Principal component

由图 2 可知, 随固沙年限增加, 蚁丘内中小型土壤节肢动物群落总个体数以及球角蛭属、等节蛭属和小真古蛭科个体数均呈显著增加趋势 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$), 而在蚁丘外仅发现总个体数以及球角蛭属个体数呈显著增加趋势 ($P < 0.05$)。一方面说明固沙植被演替对总个体数和球角蛭属个体数分布产生正效应, 而且蚁丘微生境可以提升这种正效应; 另一方面说明虽然固沙植被演替对等节蛭属和小真古蛭科个体数分布的影响较小, 但依托蚁丘微生境固沙植被演替可以对其产生一种正效应。

总个体数表现为 8、34、57a 固沙植被区蚁丘内显著高于蚁丘外 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$ 或 $P < 0.001$)。球角蛭属个体数表现为在 8、34、57a 固沙植被区蚁丘内均显著高于蚁丘外 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$)；等节蛭属个体数表现为在 34、57a 固沙植被区蚁丘内均显著高于蚁丘外 ($P < 0.01$)；小真古螨科个体数表现为在 57a 固沙植被区蚁丘内显著高于蚁丘外 ($P < 0.01$)。

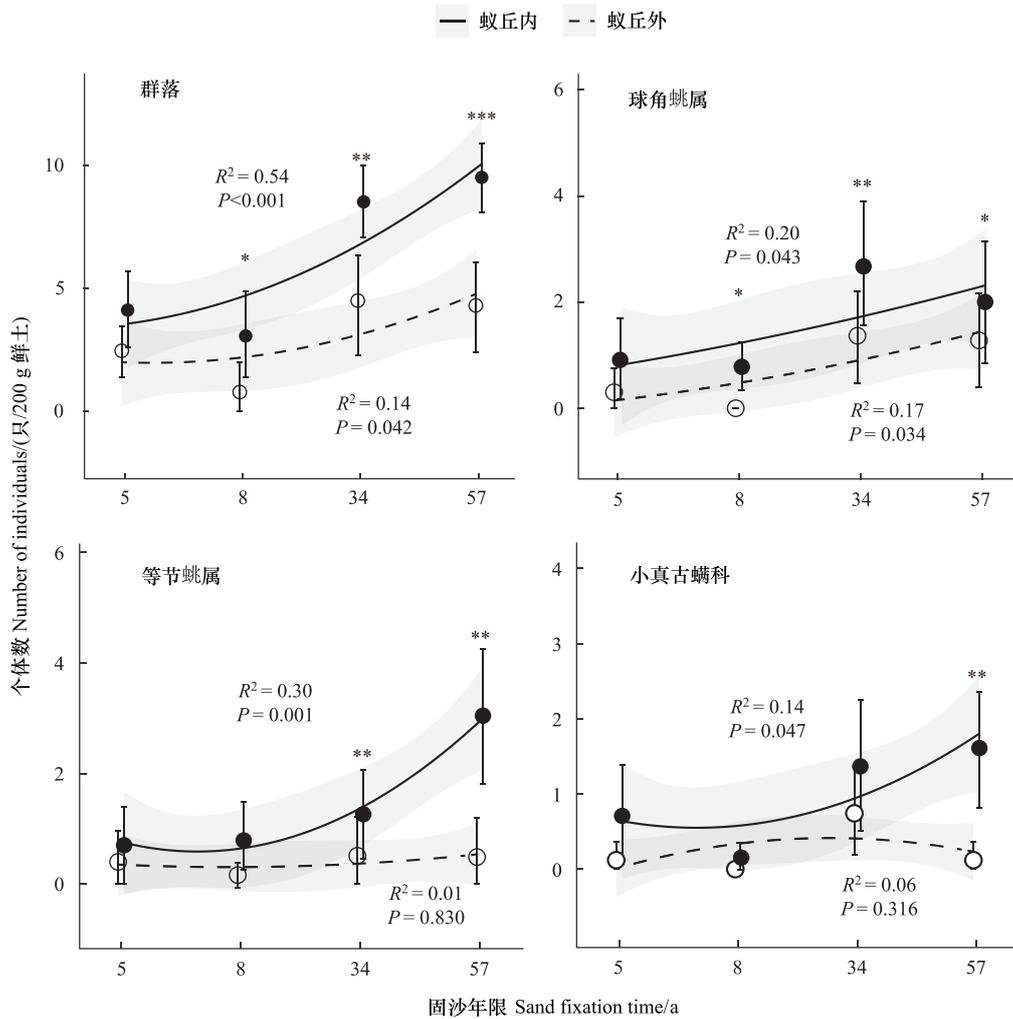


图 2 不同固沙植被区蚁丘内外中小型土壤节肢动物群落及优势类群数量动态

Fig.2 The individuals of the total and dominant groups changed of soil meso-micro arthropods inside and outside ant mound in the different revegetated areas

阴影区域表示拟合曲线的 95% 置信区间；* 或 ** 或 *** 表示同一年限蚁丘内和蚁丘外的差异性达到 $P < 0.05$ 或 0.01 或 0.001 水平

3.3 中小型土壤节肢动物群落多样性特征

由图 3 可知,随固沙年限增加,蚁丘内中小型土壤节肢动物群落类群数、Shannon-Wiener 指数和均匀度指数均呈现显著增加趋势 ($P < 0.001$),而蚁丘外均无显著变化 ($P > 0.05$)。说明虽然固沙植被演替对中小型土壤节肢动物群落类群数、Shannon-Wiener 指数和均匀度指数分布的影响较小,但依托蚁丘微生境固沙植被演替可以对其产生一种正效应。

中小型土壤节肢动物群落类群数和 Shannon-Wiener 指数表现为 34、57a 固沙植被区蚁丘内显著高于蚁丘外 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$),即蚁丘内分别是蚁丘外的 1.6 倍、2.2 倍和 2.3 倍、3.9 倍。中小型土壤节肢动物群落均匀度指数表现为仅在 57a 固沙植被区呈现蚁丘内显著高于蚁丘外的分布特征 ($P < 0.01$),即蚁丘内是蚁丘外的 5.4 倍。

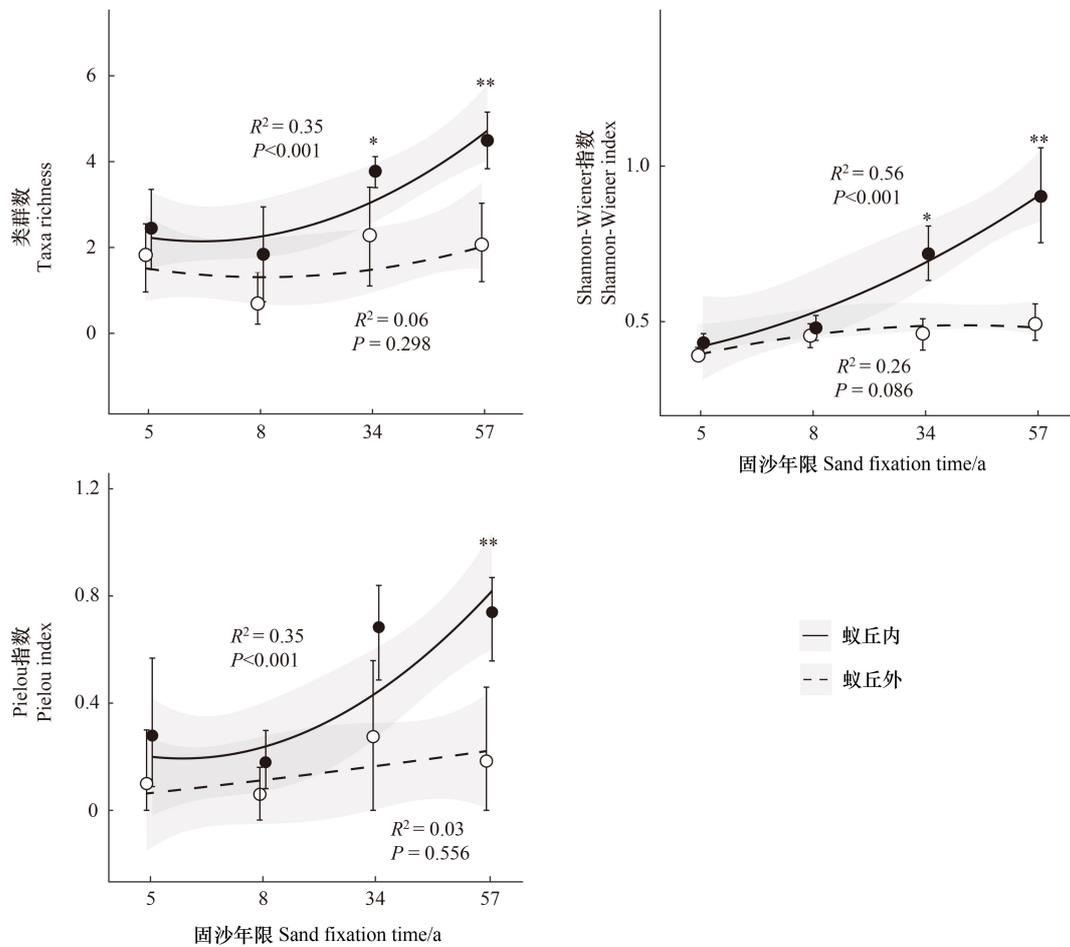


图3 不同固沙植被区蚁丘内外小型土壤节肢动物多样性特征

Fig.3 Characteristics of soil meso- micro arthropods diversity inside and outside ant mound in the different revegetated areas

3.4 中小型土壤节肢动物群落与土壤环境因子间的关系

从表4可以看出,在5a固沙植被区,小真古螨科与土壤电导率显著正相关($P < 0.05$)。在8a固沙植被区球角蛭属与土壤黏粒显著正相关($P < 0.05$)。在34a固沙植被区,球角蛭属与土壤全氮显著正相关($P < 0.05$);等节蛭属与土壤有机碳和土壤全氮显著正相关($P < 0.05$)。在57a固沙植被区,球角蛭属、等节蛭属和小真古螨科均与土壤全钾呈现显著正相关($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$)。

由图4可知,在5a固沙植被区,pSEM解释了中小型土壤节肢动物个体数总变异的25%;蚁丘未对中小型土壤节肢动物群落有直接或间接影响。在8a固沙植被区,pSEM解释了中小型土壤节肢动物个体数总变异的56%;蚁丘对个体数有直接正向影响,并且蚁丘通过土壤黏粒对个体数有间接正向影响。在34a固沙植被区,pSEM分别解释了中小型土壤节肢动物个体数和多样性总变异的49%和45%;蚁丘对个体数和多样性均有直接正向影响,并且蚁丘通过土壤全氮对个体数和多样性均有间接正向影响。在57a固沙植被区,pSEM分别解释了中小型土壤节肢动物个体数、群落组成和多样性总变异的83%、38%和61%;蚁丘对个体数、群落组成和多样性均有直接正向影响,并且蚁丘通过土壤全钾对个体数、群落组成和多样性均有间接正向影响。

4 讨论

4.1 蚁丘对中小型土壤节肢动物群落组成的影响

本研究中,在固沙前中期(5、8、34a)蚁丘并未改变中小型土壤节肢动物群落结构,仅在固沙后期(57a)显

著影响了中小型土壤节肢动物群落结构(图2)。这可能是在固沙后期小真古螨科和等节蛭属个体数的显著增加导致的结果。有研究表明,中小型土壤节肢动物群落结构发生变化的主要原因是环境条件和食物资源的改变^[15]。虽然蚂蚁筑巢活动形成的蚁丘微生境为中小型土壤节肢动物提供了有利的生存环境^[11],但是在固沙前中期,整体土壤改良仍处于较低水平^[17],导致多数物种生存受限;而经过长期固沙,蚁丘内土壤水分、土壤黏粒以及土壤有机碳、全氮、全磷等含量大幅提升,可支持更多种类和数量的中小型土壤节肢动物居住和繁殖^[17,28-29]。

表4 不同固沙植被区中小型土壤动物优势类群与环境因子的 Pearson 相关性分析

Table 4 Pearson's correlation coefficient of soil meso-micro arthropods dominant group and environmental factors in the different revegetated areas

年限/a Year	优势类群 Dominant group	土壤 电导率 EC	土壤 pH	土壤 含水量 WC	土壤 有机碳 SOC	土壤 全氮 TN	土壤 全磷 TP	土壤 全钾 TK	土壤 有效磷 AP	土壤 有效钾 AK	土壤 黏粒 Clay	土壤 粉粒 Silt	土壤 砂粒 Sand
5	球角蛭属 <i>Hypogastrura</i>	0.49 *											
	等节蛭属 <i>Isotoma</i>												
	小真古螨科 Eupalopsellidae												
8	球角蛭属 <i>Hypogastrura</i>										0.53 *		
	等节蛭属 <i>Isotoma</i>												
	小真古螨科 Eupalopsellidae												
34	球角蛭属 <i>Hypogastrura</i>					0.36 *							
	等节蛭属 <i>Isotoma</i>				0.38 *	0.45 *							
	小真古螨科 Eupalopsellidae												
57	球角蛭属 <i>Hypogastrura</i>							0.51 *					
	等节蛭属 <i>Isotoma</i>							0.54 *					
	小真古螨科 Eupalopsellidae							0.60 **					

EC: 土壤电导率 Electrical conductivity; WC: 土壤含水量 Water content; SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; TN: 土壤全氮 Total nitrogen; TP: 土壤全磷 Total phosphorus; TK: 土壤全钾 Total kalium; AP: 土壤有效磷 Available phosphorus; AK: 土壤有效钾 Available kalium

在固沙过程中,蚁丘内外中小型土壤节肢动物个体数均显著增加,但在 8a 固沙植被区开始表现为蚁丘内显著高于蚁丘外(图3)。可能原因是,随固沙年限增加,土壤结皮的形成以及植被覆盖度的提高^[30],减少了风蚀作用^[17],土壤环境逐渐稳定^[29,31],有利于中小型土壤节肢动物繁殖。而蚂蚁筑巢活动增加了土壤物理结构的持久性,改善了土壤环境^[32-33],促进了中小型土壤节肢动物个体数的进一步增加。这表明固沙植被演替对中小型土壤节肢动物个体数分布具有正效应,而蚁丘微生境可以提升这种正效应。

由于中小型土壤节肢动物不同类群对环境敏感性的差异^[18],造成了球角蛭属、等节蛭属和小真古螨科个体数对人工固沙植被演替响应的先后不同。在固沙初期(8a),总个体数以及球角蛭属与土壤黏粒显著正相关(表4、图4)。蚁丘内土壤黏粒含量显著增加,更有利于蚁丘内部结构的维持^[34],增加通透性;另有研究表明土壤黏粒含量增加有利于整体水分的维持^[35],导致蚁丘内的微气候开始湿润起来,降低了身体失水的风险^[13],进而促进了中小型土壤节肢动物总个体数以及球角蛭属个体数的增加。在固沙中后期(34、57a),总个体数以及球角蛭属、等节蛭属和小真古螨科个体数与土壤有机碳、全氮和全钾显著正相关(表4、图4)。在

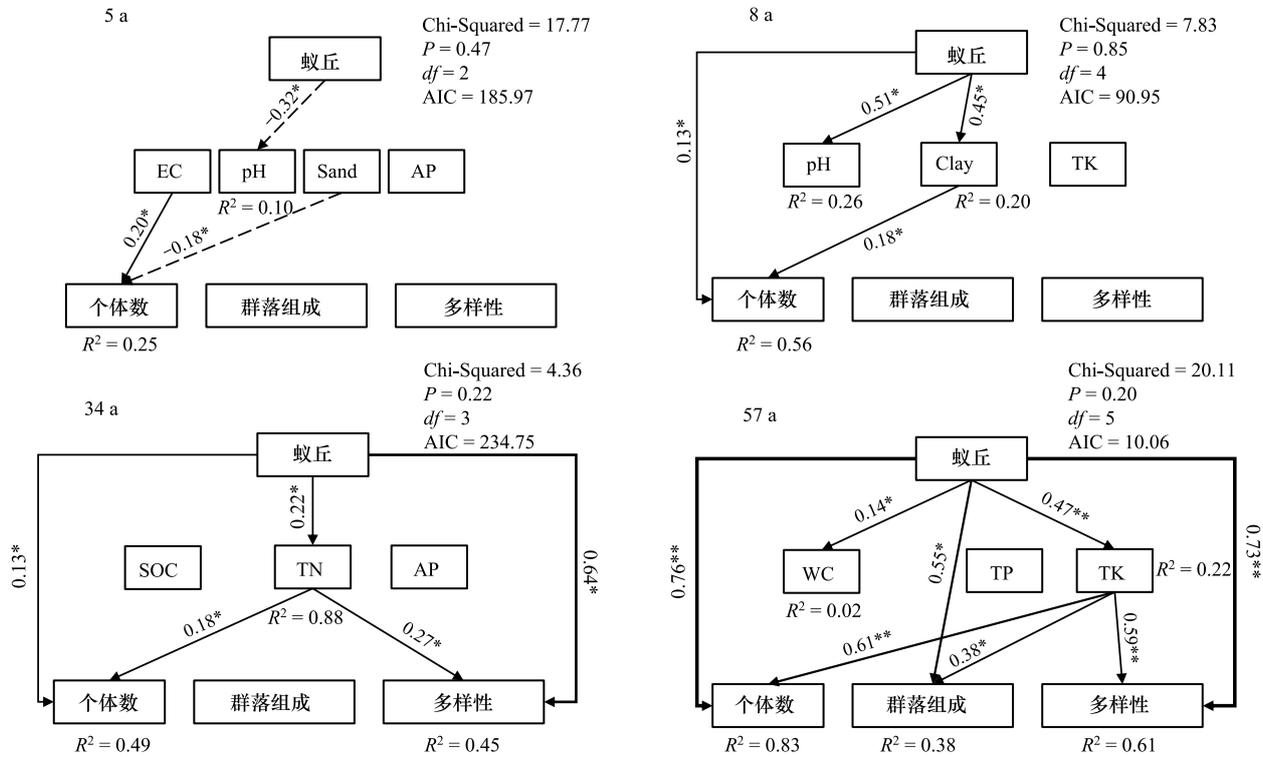


图 4 不同固沙植被区中小型土壤节肢动物群落与环境因子的结构方程模型

Fig.4 Piecewise structural equation modelling (pSEM) of soil meso-micro arthropod communities and environmental factors in the different revegetated areas(PSEM)

实线表示正效应,虚线表示负效应;EC: 土壤电导率 Electrical conductivity; WC: 土壤含水量 Water content; SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; TN: 土壤全氮 Total nitrogen; TP: 土壤全磷 Total phosphorus; TK: 土壤全钾 Total kalium; AP: 土壤有效磷 Available phosphorus

地中海草原对蚁穴的研究中也发现土壤肥力与螨类和跳虫的生长发育显著相关^[13]。经过蚂蚁长期聚集植物凋落物和排泄物等活动,改善了土壤结构,提高了土壤养分,从而为中小型土壤节肢动物更多类群提供足够的食物资源和更适宜的生存环境^[11, 16]。此外,在 57a 固沙植被区,蚁丘通过土壤全钾对群落组成有间接正向影响(图 4),表明在固沙植被区植被演替后期,土壤全钾成为中小型土壤节肢动物群落组成发生变化的主要驱动因子。总之,随固沙年限增加,不同类群对蚁丘扰动的响应不同,导致中小型土壤节肢动物群落组成发生变化。

4.2 蚁丘对中小型土壤节肢动物群落多样性的影响

在固沙植被演替的不同时期,中小型土壤节肢动物多样性受到蚁丘微生境的影响不同。本研究中,在 5a, 8a 固沙植被区,蚁丘仅改变了土壤 pH 和土壤黏粒含量,但未对中小型土壤节肢动物群落多样性产生显著影响。这可能是因为固沙植被演替初期,资源条件严重受限^[33],仅个别土壤指标的变化并不能改善整体环境的恶劣,导致蚁丘对中小型土壤节肢动物多样性分布的影响较小,这与 Janson 在北美 savanna 草原对蚁丘的研究中结果相吻合^[36]。说明固沙植被建植初期,蚁丘对中小型土壤节肢动物分布的影响较小。

在 34a 固沙植被区,蚁丘可能通过土壤全氮含量显著增加了中小型土壤节肢动物多样性,这可能与蚁丘中土壤全氮升高加快了微生物的生长繁殖^[37],从而改变了中小型土壤节肢动物食物资源的数量和质量^[38]密切相关,间接促进了中小型土壤节肢动物多样性的增加(图 4)。在 57a 固沙植被区,蚁丘可能通过土壤全钾而显著增加了中小型土壤节肢动物多样性,原因可能是土壤全钾增加通过影响微生物代谢活性和功能多样性^[37, 39],为中小型土壤节肢动物提供了丰富的食物资源^[11],从而间接提高了蚁丘内中小型土壤节肢动物多样性。说明固沙植被建植中后期,蚁丘对中小型土壤节肢动物分布有显著影响。此外,在植被演替过程中蚁

丘外中小型土壤节肢动物多样性无显著变化(图3),这表明虽然植被演替对中小型土壤节肢动物多样性无显著影响,但依托蚁丘微生境可以对其产生一种正效应。

综合分析发现,在演替初期和中后期,蚁丘表现为直接和间接作用,即演替初期蚁丘主要通过改变土壤黏粒含量增加中小型土壤节肢动物个体数,而在长期演替后则分别通过土壤全氮含量和全钾含量来影响中小型土壤节肢动物个体数和多样性、甚至群落组成结构。有研究表明,蚂蚁筑巢活动导致生物多样性增加会促进生态系统稳定性^[40],从而有利于固沙植被区土壤进一步恢复。因此,在腾格里沙漠人工固沙植被区,经过长期植被演替后,蚁丘对生物多样性保育作用更明显,在固沙8年开始就应当注重对蚁丘的保护,固沙34年是提升生物多样性的关键时间节点。

5 结论

在腾格里沙漠东南缘,固沙植被在经过长期演变后,蚁丘微生境表现出对中小型土壤节肢动物群落结构及多样性产生显著影响。在固沙植被短期(8年)演替后,蚁丘开始促进小型土壤节肢动物优势类群个体数及总个体数增加;其中优势类群球角蚁属、等节蚁属和小真古蟻科的响应先后不同,分别在固沙第8、34、57年开始增加。而在固沙植被长期(34年)演替后,表现为蚁丘开始促进中小型土壤节肢动物多样性增加。并且,长期演替后,蚁丘微生境对裸沙地中小型土壤节肢动物具有重要辐射作用,有利于固沙植被区中小型土壤节肢动物个体数增加。影响中小型土壤节肢动物群落的主要环境因子在固沙初期为土壤黏粒含量,在中后期为土壤全氮和全钾含量。

参考文献(References):

- [1] Wang G Y, Innes J L, Lei J F, Dai S Y, Wu S W. China's forestry reforms. *Science*, 2007, 318(5856): 1556-1557.
- [2] Cao S X, Chen L, Shankman D, Wang C M, Wang X B, Zhang H. Excessive reliance on afforestation in China's arid and semi-arid regions: lessons in ecological restoration. *Earth Science Reviews*, 2011, 104(4): 240-245.
- [3] Le Houerou H N. Restoration and rehabilitation of arid and semiarid Mediterranean ecosystems in North Africa and West Asia: a review. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 2000, 14(1): 3-14.
- [4] 罗雅曦,刘任涛,张静,常海涛. 腾格里沙漠草方格固沙林土壤颗粒组成、分形维数及其对土壤性质的影响. *应用生态学报*, 2019, 30(2): 525-535.
- [5] 杨贵森,吕星宇,虎瑞,黄磊,张志山. 腾格里沙漠固沙植被区微生境土壤微生物功能群时空格局. *土壤学报*, 2022, 59(2): 580-590.
- [6] Hölldobler B, Wilson E O. *The ants*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1990.
- [7] Dauber J, Niechoj R, Baltruschat H, Wolters V. Soil engineering ants increase grass root arbuscular mycorrhizal colonization. *Biology and Fertility of Soils*, 2008, 44(5): 791-796.
- [8] Akira Y, Nobuhiko S, Jun T. Species diversity and biological trait function: effectiveness of ant-plant mutualism decreases as ant species diversity increases. *Functional Ecology*, 2021, 35(9): 2012-2025.
- [9] Li B. *Ecology*. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [10] Zhao Y Y, Long R J, Lin H L, Ren J Z. Study on pastoral ecosystem security and its assessment. *Acta Prataculturae Sinica*, 2008, 17(2): 143-150.
- [11] 薛娟,魏雪,何先进,吴鹏飞. 高寒草甸生态系统蚁丘对小型土壤节肢动物群落的影响. *生态学报*, 2021, 41(4): 1613-1624.
- [12] 冯怡琳,王永珍,林永一,赵文智,高俊伟,刘继亮. 戈壁生态系统蚁穴微生境对大型土壤动物多样性的影响生物多样性, 2022, 30(12): 88-98.
- [13] Almeida T D, Francois M, Mathieu S, Raphal G, Thierry D, Olivier B. Above- and below-ground effects of an ecosystem engineer ant in Mediterranean dry grasslands. *Proceedings of The Royal Society B: Biological Sciences*, 2020, 287: 20201840.
- [14] Boulton A M, Jaffee B A, Scow K M. Effects of a common harvester ant (*Messor andrei*) on richness and abundance of soil biota. *Applied Soil Ecology*, 2003, 23(3): 257-265.
- [15] 吴鹏飞,杨大星. 若尔盖高寒草甸退化对中小型土壤动物群落的影响. *生态学报*, 2011, 31(13): 3745-3757.
- [16] 周磊,魏雪,王长庭,吴鹏飞. 高寒草地小型土壤节肢动物群落特征及其对草地退化的指示作用. *草业学报*, 2022, 31(3): 34-46.
- [17] 曾飞越,刘任涛,吉雪茹,杨敏,方进,周磊,赵文智. 腾格里沙漠固沙植被区蚂蚁群落分布特征及其对土壤理化性质的影响. *生态学*

- 报, 2024, 44(3): 1104-1115.
- [18] Loranger-Merciris G, Daniel I, Bernhard-Reversat F, Ponge J F, Lavelle P. Soil fauna abundance and diversity in a secondary semi-evergreen forest in Guadeloupe (Lesser Antilles): influence of soil type and dominant tree species. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, 44(2): 269-276.
- [19] Wardle D A, Bardgett R D, Klironomos J N, Setälä H, van der Putten W H, Wall D H. Ecological linkages between aboveground and belowground biota. *Science*, 2004, 304(5677): 1629-1633.
- [20] 王思铭, 陈又清. 蚂蚁与排泄蜜露的同翅目昆虫的相互作用及其生态学效应. *应用昆虫学报*, 2011, 48(1): 183-190.
- [21] Brown G, Scherber C, Ramos P Jr, Ebrahim E K. The effects of harvester ant (*Messor ebeninus* Forel) nests on vegetation and soil properties in a desert dwarf shrub community in north-eastern Arabia. *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 2012, 207(7): 503-511.
- [22] Berdugo M, Delgado-Baquerizo M, Soliveres S, Hernández-Clemente R, Zhao Y C, Gaitán J J, Gross N, Saiz H, Maire V, Lehmann A, Rillig M C, Solé R V, Maestre F T. Global ecosystem thresholds driven by aridity. *Science*, 2020, 367(6479): 787-790.
- [23] 李新荣, 张志山, 谭会娟, 高艳红, 刘立超, 王新平. 我国北方风沙危害区生态重建与恢复: 腾格里沙漠土壤水分与植被承载力的探讨. *中国科学: 生命科学*, 2014, 44(3): 257-266.
- [24] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社, 1998.
- [25] 忻介六. 农业螨类学. 北京: 农业出版社, 1988.
- [26] 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.
- [27] Barnes A D, Allen K, Kreft H, Corre M D, Jochum M, Veldkamp E, Clough Y, Daniel R, Darras K, Denmead L H, Farikhah Haneda N, Hertel D, Knohl A, Kotowska M M, Kurniawan S, Meijide A, Rembold K, Edho Prabowo W, Schneider D, Tschardt T, Brose U. Direct and cascading impacts of tropical land-use change on multi-trophic biodiversity. *Nature Ecology & Evolution*, 2017, 1: 1511-1519.
- [28] 蒋云峰, 马南, 张爽, 陈智文, 解宏图. 黑土区免耕秸秆不同覆盖频率下大型土壤动物群落结构特征. *生态学杂志*, 2017, 36(2): 452-459.
- [29] 王文帆, 刘任涛, 郭志霞, 冯永宏, 蒋嘉瑜. 腾格里沙漠东南缘固沙灌丛土壤理化性质及分形维数. *中国沙漠*, 2021, 41(1): 209-218.
- [30] Bailey D L, Held D W, Kalra A, Twarakavi N, Arriaga F. Biopores from mole crickets (*Scapteriscus* spp.) increase soil hydraulic conductivity and infiltration rates. *Applied Soil Ecology*, 2015, 94: 7-14.
- [31] 刘任涛, 朱凡. 流动沙地人工种植灌丛对地面节肢动物多样性与功能群结构的影响. *林业科学*, 2016, 52(2): 91-98.
- [32] Jones C G, John H L, Moshe S. Organisms as ecosystem engineers. *Ecology*, 1997, 78(7): 1946-1957.
- [33] 陈应武, 李新荣, 苏延桂, 窦彩虹, 贾晓红, 张志山. 腾格里沙漠人工植被区掘穴蚁 (*Formica cunicularia*) 的生态功能. *生态学报*, 2007, 27(4): 1508-1514.
- [34] Jones C G, Lawton J H, Shachak M. Positive and negative effects of organisms as physical ecosystem engineers. *Ecology*, 1997, 78(7): 1946.
- [35] Gaur N, Binayak P M. Land-surface controls on near-surface soil moisture dynamics: Traversing remote sensing footprints. *Water Resources Research*, 2016, 52(8): 6365-6385.
- [36] Janson L, Mallott L, McGinty L. Soil temperature and arthropod abundance are lower near ant mounds. *Tillers*, 2002, 3: 15-19.
- [37] 杨有芳, 字洪标, 刘敏, 阿的鲁骥, 陈焱, 王长庭. 高寒草甸土壤微生物群落功能多样性对广布弓背蚂蚁丘扰动的响应. *草业学报*, 2017, 26(1): 43-53.
- [38] 马尚飞, 红梅, 赵巴音那木拉, 赵乌英嘎, 王文东, 卢俊艳, 杨殿林. 模拟氮沉降对草甸草原中小型土壤节肢动物群落的影响. *土壤*, 2021, 53(4): 755-763.
- [39] 胡雷, 阿的鲁骥, 字洪标, 王长庭. 高原鼯鼠扰动及恢复年限对高寒草甸土壤养分和微生物功能多样性的影响. *应用生态学报*, 2015, 26(9): 2794-2802.
- [40] 刘玲莉, 井新, 任海燕, 黄俊胜, 贺金生, 方精云. 草地生物多样性与稳定性及对草地保护与修复的启示. *中国科学基金*, 2023, 37(4): 560-570.