

DOI: 10.20103/j.stxb.202301050043

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.

Zeng F Y, Liu R T, Ji X R, Yang M, Fang J, Zhou L, Zhao W Z. Characteristics of ant community and its influence on soil in sand-fixing revegetation area of Tengger Desert. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(3): 1104-1115.

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

曾飞越^{1,2,3}, 刘任涛^{1,2,3,*}, 吉雪茹^{1,2,3}, 杨敏^{1,2,3}, 方进^{1,2,3}, 周磊⁴, 赵文智⁵

1 宁夏大学生态环境学院, 银川 750021

2 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021

3 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

4 宁夏大学农学院, 银川 750021

5 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000

摘要:为了阐明固沙过程中蚂蚁群落结构分布特征及其对土壤性质的影响,在腾格里沙漠固沙植被区选取流动沙地以及 5 a、8 a、34 a 和 57 a 固沙植被区为研究样地,对不一样地蚂蚁群落的个体数、类群数以及蚁丘内外土壤理化性质进行测定,进而分析了不一样地蚂蚁群落分布特征及其与土壤因子间的关系。结果表明:(1)固沙植被区蚂蚁群落中的优势类群为掘穴蚁(*Formica cunicularia*),个体数占比为 78.87%。(2)57 a 固沙植被区蚂蚁密度显著低于 8 a 和 34 a 固沙植被区($P<0.05$);5 a 固沙植被区蚂蚁类群数显著低于其他植被区($P<0.05$)。(3)57 a 固沙植被区蚁丘中土壤含水量、土壤黏粒和土壤全钾显著高于非蚁丘,而土壤电导率和土壤粉粒显著低于非蚁丘($P<0.05$)。8 a 和 57 a 固沙植被区蚁丘中土壤 pH 显著高于非蚁丘,8 a 固沙植被区蚁丘中土壤有机碳显著高于非蚁丘,8 a 和 34 a 固沙植被区蚁丘中土壤全氮显著高于非蚁丘($P<0.05$)。(4)蚂蚁群落组成与土壤粒径、电导率、pH、有机碳、全氮、全磷和有效磷含量的相关关系显著;偏 RDA 结果表明,蚂蚁类群数是影响固沙区土壤理化性质的主要限制因子。综合表明,腾格里沙漠不同固沙年限植被区蚂蚁群落组成差异较大,更丰富的蚂蚁群落有利于改善土壤质地,促进土壤理化性质向良好的方向发展,对实现荒漠生态系统恢复起到推进作用。

关键词:腾格里沙漠;人工固沙林;蚂蚁群落;土壤理化性质

Characteristics of ant community and its influence on soil in sand-fixing revegetation area of Tengger Desert

ZENG Feiyue^{1,2,3}, LIU Rentao^{1,2,3,*}, JI Xueru^{1,2,3}, YANG Min^{1,2,3}, FANG Jin^{1,2,3}, ZHOU Lei⁴, ZHAO Wenzhi⁵

1 School of Ecology and Environments, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

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

3 Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwestern China, Yinchuan 750021, China

4 College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

5 Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

Abstract: The objective of this study is to clarify the changes in the composition and quantitative characteristics of ant communities during sand fixation and their effects on soil physical and chemical properties. In this study, the Tengger Desert sand-fixing vegetation area was used as the research area, the 5-year, 8-year, 34-year and 57-year sand-fixing vegetation

基金项目:国家自然科学基金(41867005);宁夏重点研发计划项目(2021BEG03007);宁夏自然科学基金重点项目(2020AAC02014)

收稿日期:2023-01-05; **网络出版日期:**2023-11-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: nxuli2012@126.com

areas were used as the research plots, and the mobile sand land was used as the control. We measured the number of individuals and groups of ant communities in different plots and the physical and chemical properties of soil inside and outside the ant mound, and analyzed the distribution characteristics of ant communities in different plots and their relationship with soil factors. The results showed that: (1) the dominant group in the ant community in the sand-fixing vegetation area was *Formica cunicularia*, accounting for 78.87%. (2) The density of ants in the 57-year sand-fixing vegetation area was significantly lower than that in the 8-year and 34-year sand-fixing vegetation areas ($P < 0.05$). The number of ant groups in the 5-year sand-fixing vegetation area was significantly lower than that in other vegetation areas ($P < 0.05$). (3) Soil water content, soil conductivity, soil silt and clay, and soil total potassium showed the significant differences between ant mounds and non-ant mounds only in the 57-year sand-fixing vegetation area. Specifically, soil water content, soil clay, and soil total potassium showed that ant mounds were significantly higher than non-ant mounds, while soil conductivity and soil silt showed that ant mounds were significantly lower than non-ant mounds. The soil pH showed that the anthills in the sand-fixing vegetation area were significantly higher than the non-anthills only in 8 years and 57 years ($P < 0.05$). The soil organic carbon showed that the anthills in the sand-fixing vegetation area were significantly higher than the non-anthills only in 8 years. The soil total nitrogen showed that the anthills in the sand-fixing vegetation area were significantly higher than the non-anthills only in 8 years and 34 years ($P < 0.05$). (4) The ant community composition was significantly correlated with soil particle size, electrical conductivity, pH, organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, and available phosphorus content. Partial redundancy analysis results results showed that the number of ant groups was the main limiting factor affecting soil physical and chemical properties in sand-fixing areas. The composition of ant communities in different sand-fixing times in Tengger Desert was quite different. More abundant ant communities were conducive to improving soil texture, promoting the development of soil physical and chemical properties in a good direction, and promoting the restoration of desert ecosystem.

Key Words: Tengger Desert; artificial sand-fixed plantation; ant community composition; soil physical-chemical properties

全球干旱和半干旱区面积约占陆地总面积的 45%,生态环境极其脆弱^[1]。在干旱和半干旱地区,由于大规模农牧业发展和其他不合理的人类活动,伴随区域气候问题,导致荒漠化急速扩张,对全球尤其干旱、半干旱地区造成一系列的经济、社会和环境问题,严重威胁人类社会的可持续发展^[2]。建立固沙植被区,利用人工固沙林防沙治土,逐步实现流动沙地的固定是沙漠生态系统恢复的主要措施之一^[3],在全球干旱沙漠地区得到了广泛的应用,也是荒漠化防治最为有效的方法之一^[4-5]。随着人工固沙林的建立,风蚀作用减弱,加之枯落物及根系分泌物在灌丛周围土壤沉积,逐渐改善土壤质量为土壤动物生长、繁殖提供条件^[6-7]。作为沙漠生态系统土壤动物的优势类群,蚂蚁的取食和筑巢活动是沙漠生态系统中不可忽视的生物干扰因子^[8-9]。

蚂蚁(Formicidae)属于节肢动物门—昆虫纲—膜翅目,在全球分布广泛,种类数量庞大,能对生态过程起着重要作用^[10-11]。蚂蚁通过搬运、取食、消化及排泄有机残体,直接影响了土壤养分的重新分配,对土壤理化性质产生了显著影响^[12]。其生命活动在食物网、物质循环、能量流动及土壤构成中均起着重要作用^[13-16]。荒漠化防治过程中,不同固沙年限蚂蚁群落组成也不同,可能对土壤理化性质产生的影响也不同。因此,研究腾格里沙漠固沙植被区蚂蚁群落组成、数量特征及其对土壤理化性质的影响,对于探究沙漠生态系统荒漠化防治过程中蚂蚁的生态学作用有重要意义。

近年来,国内外关于蚂蚁对土壤理化性质的研究较为丰富。已有的研究表明,蚂蚁群落会对土壤温度、微生物生物量、有机碳、全碳起提升作用,同时降低土壤 pH 值^[17-25]。此外,也有研究揭示了蚂蚁群落在生态系统恢复过程中的变化,如 Van Humber 等^[18]对南非高地燃煤电站蚂蚁群落的研究发现,蚂蚁群落丰富度与其恢复年限呈正相关。但是关于同一生态系统恢复过程中蚂蚁群落组成变化及其对土壤理化性质影响的研究较少。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区域,选取流动沙地、5 a、8 a、34 a 和 57 a

植被区为调查样地,通过比较不同固沙阶段蚂蚁群落组成及数量特征,同时比较蚁丘与非蚁丘土壤理化性质,旨在揭示蚂蚁群落特征在沙漠生态系统固沙过程中的变化以及蚂蚁群落不同时期对于土壤理化性质的影响,进而为蚂蚁在沙漠生态系统恢复过程中的功能和作用提供依据。

1 研究区概况

研究区位于宁夏中卫市境内沙坡头区“包一兰”铁路两侧非灌溉人工固沙植被保护区,地处腾格里沙漠东南缘(32°27'N,104°57'E)(图1),海拔1500 m^[26]。该区域属于草原化荒漠地带,温带大陆性气候^[1]。年均气温9.5℃,全年最低温为1月-25.7℃,最高温为7月38.1℃,昼夜温差极大。降雨多集中于5—9月,年均降雨量182 mm,年蒸发量为2400 mm。平均风速为2.9 m/s,风向多为西北风,夏季风速最大^[27]。土壤类型为风沙土^[28]。

于1956年开始,在“包一兰”铁路受到风沙破坏(风蚀和沙埋)地段,扎设1 m×1 m的麦草方格沙障并种植旱生灌木,进行防风固沙;密度为160株/100m²。经过长期演变和生态恢复,该区域逐渐由沙漠生态系统演变为草原化沙漠生态系统。不同年限固沙植被区主要优势植物中如表1所示,5 a固沙植被区优势植物种为油蒿(*Artemisia ordosica*)、花棒(*Hedysarum scoparium*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)、银灰旋花(*Convolvulus ammannii*)、沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)、沙鞭(*Psammochloa villosa*);8 a固沙植被区优势植物种为油蒿、花棒、柠条、砂蓝刺头(*Echinops gmelini*)、雾冰藜、虫实(*Corispermum declinatum*);34 a固沙植被区优势植物种为柠条、油蒿、砂蓝刺头、雾冰藜、沙葱(*Allium mongolicum*);57 a固沙植被区优势植物种为油蒿、驼绒藜(*Krascheninnikovia ceratoides*)、白草、冠芒草(*Enneapogon borealis*)、狗尾草(*Setaria viridis*)。

表1 不同固沙植被区植被情况
Table 1 Vegetation of different sand-fixing revegetation areas

固沙时间 Sand-fixing time	优势植物种 Dominant plant species
固沙 5 a Sand fixation for 5 years	油蒿(<i>Artemisia ordosica</i>)、花棒(<i>Corethroedendron scoparium</i>)、柠条(<i>Caragana korshinskii</i>)、雾冰藜(<i>Bassia dasyphylla</i>)、银灰旋花(<i>Convolvulus ammannii</i>)、沙蓬(<i>Agriophyllum squarrosum</i>)、沙鞭(<i>Psammochloa villosa</i>)
固沙 8 a Sand fixation for 8 years	油蒿(<i>Artemisia ordosica</i>)、花棒(<i>Corethroedendron scoparium</i>)、柠条(<i>Caragana Korshinskii</i>)、砂蓝刺头(<i>Echinops gmelini</i>)、雾冰藜(<i>Bassia dasyphylla</i>)、虫实(<i>Corispermum declinatum</i>)
固沙 34 a Sand fixation for 34 years	柠条(<i>Caragana Korshinskii</i>)、油蒿(<i>Artemisia ordosica</i>)、砂蓝刺头(<i>Echinops gmelini</i>)、雾冰藜(<i>Bassia dasyphylla</i>)、沙葱(<i>Allium mongolicum</i>)
固沙 57 a Sand fixation for 57 years	油蒿(<i>Artemisia ordosica</i>)、驼绒藜(<i>Krascheninnikovia ceratoides</i>)、白草(<i>Pennisetum centasiaticum</i>)、冠芒草(<i>Enneapogon borealis</i>)、狗尾草(<i>Setaria viridis</i>)

2 研究方法

2.1 样地选择及试验设计

本研究选择流动沙地(无蚂蚁活动,作为背景值)、5 a(固沙植被建立于2016年,此时生境中开始有蚂蚁活动及蚁丘)、8 a(固沙植被建立于2013年)、34 a(固沙植被建立于1987年)、57 a(固沙植被建立于1964年)固沙植被区为研究样地,不同研究样地间距离2—4 km。在每个研究样地选择10个30 m×30 m样区为重复,每个重复间距离为0.5—1 km。由于不同季节蚂蚁活动强度不同,故选择4月(春季,蚂蚁恢复期)、7月(夏季,此时为蚂蚁婚飞期)和10月(秋季,此时蚂蚁步入越冬期)3个季节开展调查。

2.2 蚂蚁调查与标本鉴定

在每个重复样区,布设10 m×10 m大样方1个,采用样方调查法开展蚂蚁群落组成调查。在每个大样方内,采用5点取样法于样方4角和中心位置各布设2 m×2 m小样方,共5个。首先在每个小样方内使用镊子、铲子、塑料盘等便携式工具对土壤内、地表、地被物内、树干上、植物上活动的蚂蚁进行搜索调查。然后,从小

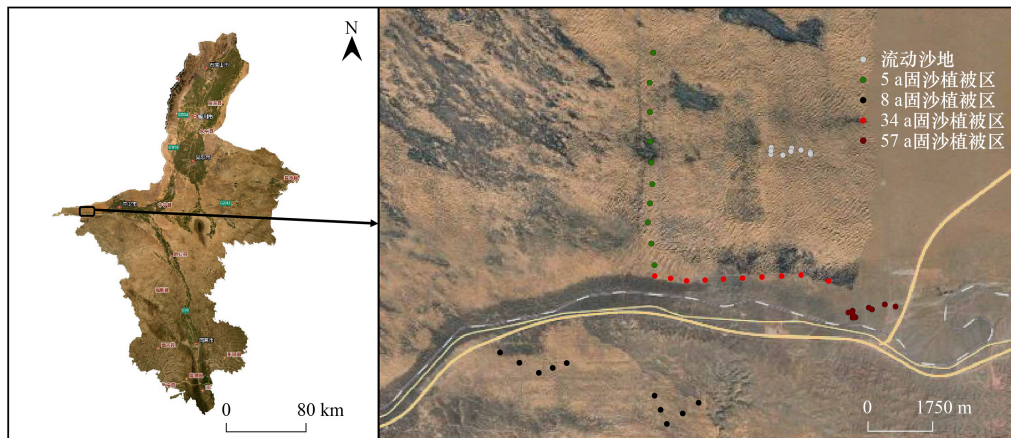


图 1 研究区概况图

Fig.1 Overview of the study area

样方 4 条边的中点位置分别向外搜查 1 m, 左转搜查 2 m, 再左转 2 m, 最后左转 1 m 回到样方边, 捕捉发现正在活动的蚂蚁。

将野外采集的蚂蚁标本用 95% 乙醇分别保存于离心管内, 用碳素笔书写采集标签, 投入指形管内对本标进行标记。带回实验室进行分类、编号、登记, 采用形态分类方法, 依据蚁科分类相关专著对蚂蚁标本逐一鉴定^[11,28-30]。根据不同蚂蚁物种个体数在总群落中所占比例, 将其划分为优势种群(占比>10%)、常见种群(占比在 1%—10%)和稀有种群(占比≤1%)。

2.3 土壤样品采样

每次取样时, 在样方中随机选取 5 个大小相似的蚁丘(均有蚂蚁活动)和距离蚁巢 5 m 外的无蚂蚁扰动非蚁丘(为减小植物根系对研究结果的影响, 仅选择无植被或植被较少处的蚁丘及非蚁丘)在去除地表枯落物后按照 0—15 cm 深度取土样进行混合, 置于塑封袋中, 放置于保温箱带回实验室。利用铝盒采集部分土壤测量土壤水分。将所采集土壤样品在自然状态下进行风干后过 2 mm 土壤筛, 用于测定土壤 pH、电导率和粒径; 另一部分研磨后用于测定土壤有机碳、全氮、全磷、全钾、有效磷和速效钾。

2.4 土壤理化性质测定

采用烘干称量法(105℃, 烘至土壤质量恒定)测定土壤含水率(%). 使用 P4 多功能测定仪测定土壤 pH 值(1:2.5 土水比悬液); 采用电导法测定土壤电导率(1:5 土水比浸提液; EC, $\mu\text{S}/\text{cm}$)。采用重铬酸钾氧化-外加加热法测定土壤有机碳; 采用凯氏定氮法(Tecator AB, Sweden)测定土壤全氮; 采用酸溶-钼锑抗比色法测定全磷; 采用 NaOH 熔融-火焰光度计法测定全钾; 采用 NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法测定有效磷; 采用醋酸铵-火焰光度计法测定速效钾; 采用盐酸-氟化铵-氯化亚锡比色法测定速效磷。

2.5 数据处理

采用 Excel 对实验数据进行初步整理与分析, 统计分析采用 SPSS 26.0 与 CANOCO 5 软件完成, 采用 Origin 2021 进行绘图。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同数据间的差异性, 采用独立样本 T 检验(Independent Sample t Test)比较蚁丘内外土壤理化性质差异的显著性。采用 Pearson 相关系数分析相关性, 采用双尾检测, 显著水平为 $P = 0.05$ 。采用冗余分析(Redundancy analysis, RDA)来研究蚂蚁群落组成与环境因子间的相关关系。

3 结果与分析

3.1 固沙植被区蚂蚁群落组成及数量特征

如表 2 所示, 在固沙植被区 5 个样地共捕获蚂蚁 5411 只, 隶属于 3 亚科 6 属 7 种(流动沙地未捕获蚂

蚁)。其中优势类群为掘穴蚁(*Formica cunicularia*),个体数占比为 78.87%;常见类群为针毛收获蚁(*Messor aciculatus*)、黄色铺道蚁(*Tetramorium flavum*)和艾箭蚁(*Cataglyphis aenescens*),个体数占比为 19.66%;稀有种为中华小家蚁(*Monomorium chinense*)、红林蚁(*Formica sinae*)和中华光胸臭蚁(*Liometopum sinense*),个体数占比为 1.47%。

表 2 不同固沙区蚂蚁群落组成

Table 2 The composition of ant community in different sand-fixing areas

类群 Group			固沙 5 a Sand fixation for 5 years		固沙 8 a Sand fixation for 8 years		固沙 34 a Sand fixation for 34 years		固沙 57 a Sand fixation for 57 years	
			个体数	优势度	个体数	优势度	个体数	优势度	个体数	优势度
切叶蚁亚科 Myrmicinae	收获蚁属	针毛收获蚁	—		36	++	233	+++	93	+++
	<i>Messor</i>	<i>Messor aciculatus</i>								
	铺道蚁属	黄色铺道蚁	—		83	++	364	+++	88	+++
	<i>Tetramorium</i>	<i>Tetramorium flavum</i>								
蚁亚科 Formicinae	小家蚁属	中华小家蚁	—		32	++	2	+	2	+
	<i>Monomorium</i>	<i>Monomorium chinense</i>								
	蚁属	掘穴蚁	1157	+++	1628	+++	964	+++	519	+++
	<i>Formica</i>	<i>Formica cunicularia</i>								
臭蚁亚科 Dolichoderinae		红林蚁	8	+	25	++	—		—	
		<i>Formica sinae</i>								
	箭蚁属	艾箭蚁	—		146	++	12	+	9	++
	<i>Cataglyphis</i>	<i>Cataglyphis aenescens</i>								
臭蚁亚科 Dolichoderinae	光胸臭蚁属	中华光胸臭蚁	—		10	+	—		—	
	<i>Liometopum</i>	<i>Liometopum sinense</i>								

“+++”为优势类群,“++”为常见类群,“+”为稀有类群;“—”表示未发现

5 a 固沙植被区蚂蚁群落的优势类群为掘穴蚁,个体数占比为 99.31%;稀有类群为红林蚁,个体数占比为 0.69%;无常见类群。8 a 固沙植被区蚂蚁群落的优势类群为掘穴蚁,个体数占比为 83.06%;常见类群为针毛收获蚁、黄色铺道蚁、中华小家蚁、红林蚁和艾箭蚁,个体数占比为 16.43%;稀有类群为中华光胸臭蚁,个体占比为 0.51%。34 a 固沙植被区蚂蚁群落的优势类群为针毛收获蚁、黄色铺道蚁和掘穴蚁,个体占比为 99.11%;稀有类群为艾箭蚁和小家蚁,个体占比为 0.89%;无常见类群。57 a 固沙植被区蚂蚁群落的优势类群为针毛收获蚁、黄色铺道蚁和掘穴蚁,个体占比为 98.45%;常见类群为艾箭蚁,个体占比为 1.27%;稀有类群为小家蚁,个体占比为 0.28%。

由图 2 可知,随着固沙时间延长,蚂蚁密度呈先增加后减少的变化趋势。具体表现为:57 a 固沙植被区蚂蚁密度显著低于 8 a 和 34 a 固沙植被区($P<0.05$),5 a 固沙植被区与其他固沙年限植被区蚂蚁密度差异不显著($P>0.05$)。蚂蚁类群数表现为固沙 5 a 植被区显著低于其他植被区($P<0.05$),其他固沙年限植被区间差异不显著($P>0.05$)。

3.2 固沙植被区蚁丘内外土壤理化特征

如图 3 所示,蚁丘内土壤含水量表现为 57 a 固沙植被区显著高于流动沙地和其他所有固沙区,蚁丘外土

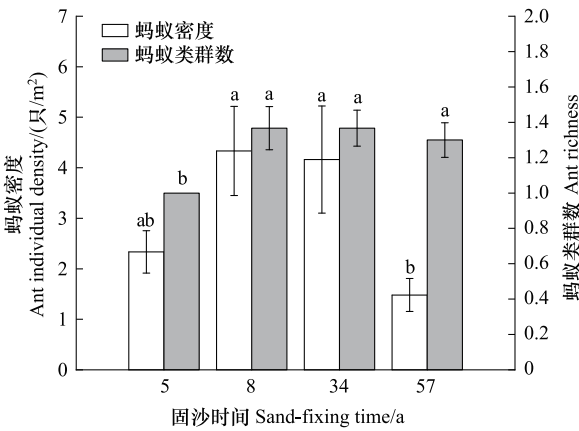


图 2 蚂蚁个体数及类群数变化(平均值±标准误)

Fig.2 Changes in the number of individuals number and taxa groups of ants (Mean±SE)

同一组直方柱上英文小写字母不同表示不同固沙样地间差异显著($P<0.05$)

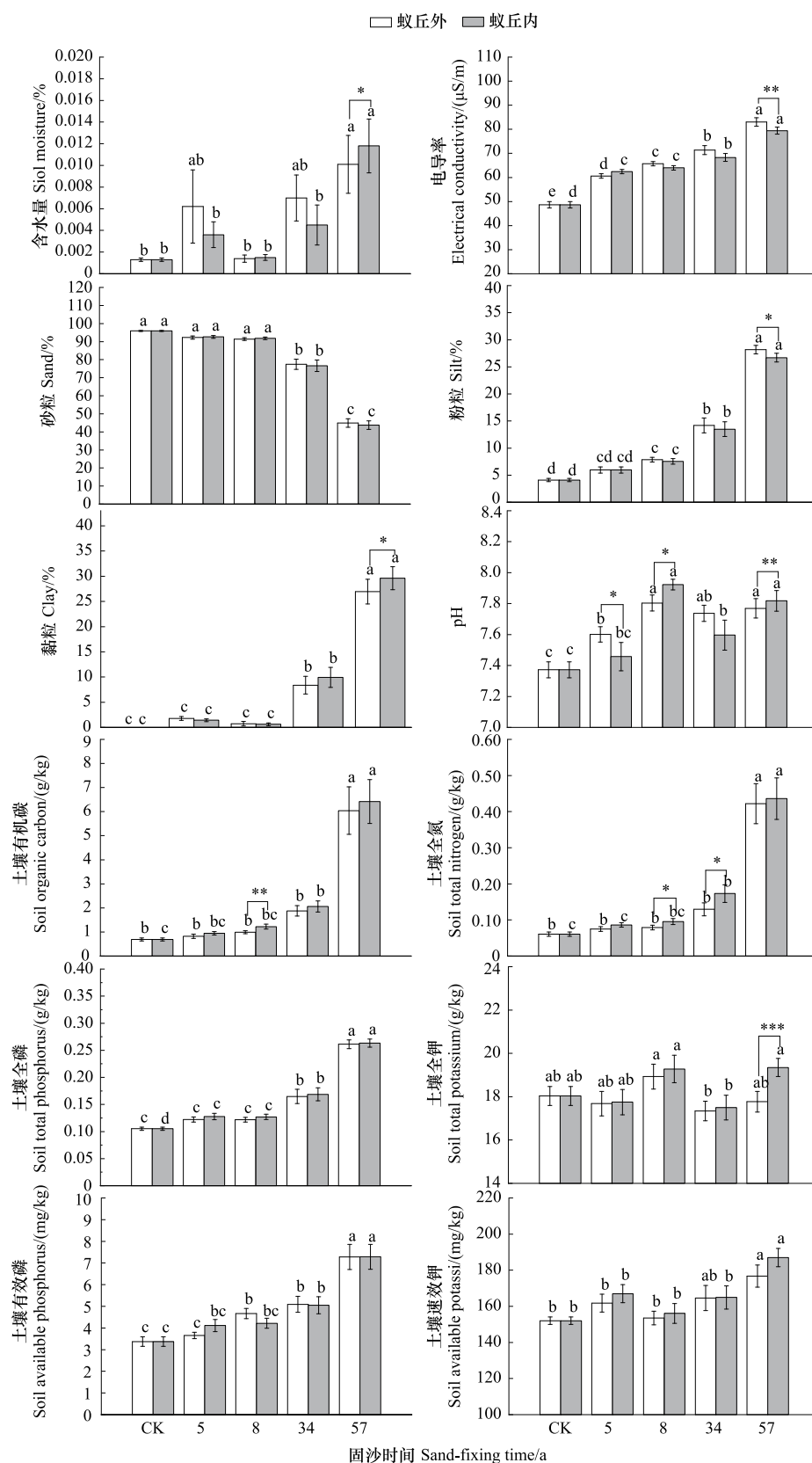


图3 固沙植被区蚁丘内外土壤理化性质(平均值±标准误)

Fig.3 The physicochemical properties of soil inside and outside ant mound in sand-fixing vegetation area (Mean±SE)

同一组直方柱上英文小写字母不同表示不同固沙样地间某指标差异显著($P<0.05$), *表示相同固沙样地蚁丘内外某指标差异显著($P<0.05$),

表示相同固沙样地蚁丘内外某指标差异极显著($P<0.01$), *表示相同固沙样地蚁丘内外某指标差异极显著($P<0.001$)

壤含水量表现为 57 a 固沙植被区显著高于流动沙地和 8 a 固沙植被区。蚁丘内土壤电导率表现为固沙 57 a>固沙 34 a>固沙 8 a 和 5 a>流动沙地($P<0.05$);蚁丘外土壤电导率表现为固沙 57 a>固沙 34 a>固沙 8 a>固沙 5 a>流动沙地($P<0.05$)。

蚁丘内土壤 pH 表现为 8 a 和 57 a 固沙植被区土壤 pH 显著高于其他年限固沙植被区($P<0.05$),34 a 固沙植被区显著高于流动沙地($P<0.05$);蚁丘外土壤表现为 57 a 和 8 a 固沙植被区土壤 pH 显著高于其他固沙年份($P<0.05$),5 a 固沙植被区土壤 pH 显著高于流动沙地($P<0.05$)。57 a 固沙植被区蚁丘内外土壤有机碳均显著高于其他固沙年限,34 a 固沙植被区蚁丘内有机碳显著高于流动沙地土壤有机碳。随着固沙时间增加,蚁丘内外土壤全氮、全磷均呈上升趋势。

由图 3 可知,在 5 a 固沙植被区蚁丘内外仅有土壤 pH 差异显著,表现为蚁丘内土壤 pH 显著低于蚁丘外($P<0.05$)。在 8 a 固沙植被区蚁丘内外土壤 pH、有机碳和全氮差异显著且均表现为蚁丘内显著高于蚁丘外($P<0.05$)。在 34 a 固沙植被区蚁丘内外仅有土壤全氮差异显著,表现为蚁丘内土壤全氮显著高于蚁丘外($P<0.05$)。在 57 a 固沙植被区,蚁丘内外土壤含水量、电导率、粉粒、黏粒、pH 和全钾差异显著,表现为蚁丘内土壤含水量、黏粒、pH 和全钾显著高于蚁丘外,蚁丘内土壤电导率和粉粒显著低于蚁丘外($P<0.05$)。

3.3 蚂蚁群落组成与土壤理化性质的关系

通过对土壤理化性质进行除趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA),计算排序轴梯度长度(lengths of gradient, LGA),由于 DCA 排序的梯度值为 $0.9<4$,故采用冗余分析(redundancy analysis, RDA)分析不同类群蚂蚁个体数及蚂蚁类群数对土壤理化性质影响的贡献率。如图 4 所示,第一典型轴($F=42.7, P=0.002$)和所有典型轴($F=5.9, P=0.002$)均达到显著水平,说明排序轴能够很好地反映土壤理化性质和蚂蚁群落组成的关系。并且,第一、二排序轴累计解释了 24.78% 的土壤理化性质的变异。

由图 4 可知,蚂蚁数量及蚂蚁类群数对土壤理化性质产生的影响不同。其中针毛收获蚁、黄色铺道蚁、小家蚁、艾箭蚁和蚂蚁类群数与第 1 排序轴呈正相关关系,掘穴蚁、红林蚁、中华光胸臭蚁与第 1 排序轴呈负相关关系;针毛收获蚁、黄色铺道蚁、小家蚁、掘穴蚁、红林蚁、中华光胸臭蚁、总蚂蚁类群数与第 2 排序轴呈正相关关系,艾箭蚁与第 2 排序轴呈负相关关系。

由表 4 可知,黄色铺道蚁与土壤 pH 呈正相关关系($P<0.05$)。掘穴蚁与土壤有机碳和全氮呈负相关关系($P<0.05$),与全磷、黏粒和粉粒呈显著负相关关系($P<0.01$),与砂粒呈显著正相关关系($P<0.01$)。艾箭蚁与土壤粉粒呈正相关关系($P<0.05$)。蚂蚁类群数与土壤有机碳、全氮、pH 呈正相关关系($P<0.05$),与全磷、有效磷、电导率、黏粒和粉粒呈显著正相关关系($P<0.01$),与砂粒呈显著负相关关系($P<0.01$)。

如表 3 所示,偏 RDA 结果分析表明蚂蚁类群数、掘穴蚁和中华光胸臭蚁个体数对土壤理化性质产生显著影响,对其影响的贡献率分别为 7.2%、4.5% 和 1%,其他种蚂蚁个体数对土壤理化性质影响未达到显著水平。因此,蚂蚁类群数、掘穴蚁和中华光胸臭蚁个体数是影响腾格里沙漠固沙植被区蚁丘土壤理化性质的主要因子。

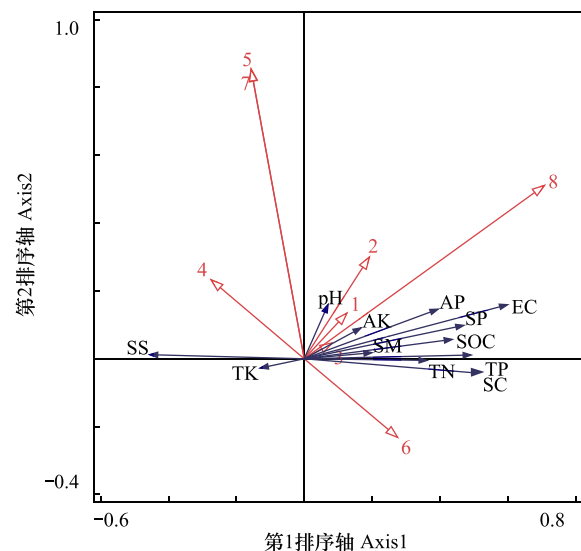


图 4 土壤因子与蚂蚁群落组成关系的 RDA 二维排序图

Fig.4 RDA two-dimensional diagram of the relationship between soil physical-chemical properties and ant community composition
SOC:土壤有机碳;TN:土壤全氮;TP:土壤全磷;TK:土壤全钾;AP:土壤有效磷;AK:土壤速效钾;pH:土壤 pH;EC:电导率;SM:土壤含水量;SC:土壤黏粒;SP:土壤粉粒;SS:土壤砂粒;1:针毛收获蚁;2:黄色铺道蚁;3:中华小家蚁;4:掘穴蚁;5:红林蚁;6:艾箭蚁;7:中华光胸臭蚁;8:蚂蚁类群数

表 3 蚂蚁群落组成对土壤理化性质的相对贡献偏 RDA 分析

Table 3 Partial RDA analysis on the relative contribution of the abundance of ant community composition to the soil physical-chemical properties

变量 Variable	贡献率 Contribution/%	F	P
蚂蚁类群数 Ant Groups richness	7.2	20.7	0.002
掘穴蚁 <i>Formica cunicularia</i>	4.5	13.8	0.002
中华光胸臭蚁 <i>Liometopum sinense</i>	1	3	0.044
黄色铺道蚁 <i>Tetramorium flavum</i>	0.7	2.1	0.142
针毛收获蚁 <i>Messor aciculatus</i>	0.8	2.4	0.096
艾箭蚁 <i>Cataglyphis aenescens</i>	0.6	1.9	0.166
中华小家蚁 <i>Monomorium chinense</i>	0.5	1.4	0.238
红林蚁 <i>Formica sinae</i>	<0.1	0.1	0.904

4 讨论

4.1 固沙植被区固沙年份对蚂蚁群落组成及数量特征影响

当流动沙地建立人工固沙植被区后,在 5 a 固沙植被区发现蚂蚁 1 亚科 2 属 2 种;8 a 固沙植被区发现蚂蚁 3 亚科 6 属 7 种;34 a 和 57 a 固沙植被区均发现蚂蚁 3 亚科 5 属 5 种,这表现出蚂蚁物种数随着固沙年限延长先增加后减少再趋于不变。从固沙 5 a 到 8 a,蚂蚁物种数增多,优势类群数不变,常见类群数增多,蚂蚁物种数达到最高。这说明随着固沙年份的短期增长,土壤养分条件改良及人工灌丛生长为蚂蚁群落定居提供了有利的条件^[31]。随着固沙时间增长,固沙 34 a 及固沙 57 a 相较于固沙 8 a 固沙区蚂蚁物种数减少,优势类群增多,常见类群减少。这说明在经过长期固沙后,固沙区土壤养分条件、植被及动物类群相对稳定^[32],这时由于种内竞争以及物种间捕食关系,部分环境适应能力弱的蚂蚁群落消失。

研究表明,蚂蚁类群数表现为 5 a 固沙植被区显著低于其他固沙植被区,蚂蚁密度则表现为随固沙时间先增大后减小的趋势,在 57 a 固沙植被区蚂蚁密度达到最小。原因在于,5 a 固沙植被区土壤多由砂粒组成,土壤养分较低。且此时固沙区以人工种植的柠条、花棒为主,不能为蚂蚁提供充足的食物,掘穴蚁作为先锋物种侵入固沙植被区,而其他种蚂蚁还不能适应这种环境^[33]。在经过 8 a 固沙后,固沙植被区土壤养分得到改善,大量一年生草本植物的侵入,植物群落从单纯的灌木层向多结构层次演变^[7]。这为蚂蚁生长繁殖提供了丰富的食物资源,这使得固沙 8 a 蚂蚁密度及类群数达到最高。在 34 a 固沙植被区,这时固沙植被区生境较固沙 8 a 更加稳定,但蚂蚁密度及类群数较固沙 8 a 变化不明显。经过长期固沙后,57 a 固沙植被区已经由沙漠半人工灌丛生态系统演替为荒漠草原生态系统^[34],土壤环境稳定,植被类型由人工灌丛演替为荒漠草原灌丛,这为其他土壤节肢动物的入侵、生长及繁殖提供了环境,加剧了土壤动物的种间竞争关系,致使生境中蚂蚁数量受到影响^[35—36]。

4.2 固沙植被区蚂蚁群落特征对土壤理化性质的影响

在荒漠生态系统中,降雨是土壤水分来源的主要途径,地表径流、蒸发及地表覆盖度会影响土壤渗水性而导致土壤含水量分布发生改变^[37]。本研究结果表明,仅在 57 a 固沙植被区发现蚁丘内土壤含水量显著高于蚁丘外,这与固沙植被的长期演变形土壤结皮影响到土壤水分的分布密切相关。即:在 57 a 固沙植被区由于地表形成土壤结皮,减少了水的入渗过程^[38],使得蚁丘外土壤含水量较低;但是蚂蚁筑巢行为可以破坏地表结皮进而使得土壤孔隙率变大^[39],改善了水从土壤表面到下层土壤的输送,提高了水的入渗,结果导致蚁丘内土壤含水量显著高于蚁丘外。土壤电导率与土壤含水量分布的表现一致,亦是仅在 57 a 固沙植被区表现为蚁丘内显著高于蚁丘外,原因可能是 57 a 固沙植被区中蚁丘内较高的土壤含水量,导致土壤盐分随水分下渗迁移^[40],故蚁丘内电导率较高。

表 4 蚂蚁群落组成与土壤理化间的相关关系
Table 4 Correlation between ant community composition and soil physical-chemical properties

土壤指标 Soil index	土壤有机碳 Soil organic carbon/ (g/kg)	土壤全氮 Soil total n (g/kg)	土壤全磷 Soil total phosphorus/ (g/kg)	土壤全钾 Soil total potassium/ (g/kg)	土壤有效磷 Soil available phosphorus/ (g/kg)	土壤速效钾 Soil available potassium/ (g/kg)	电导率 Electrical conductivity/ (μ S/m)	pH Soil pH	土壤含水量 Soil moisture/ %	黏粒 Clay/ %	粉粒 Silt/ %	砂粒 Sand/%
针毛收获蚁 <i>Messor acculatus</i>	-0.001	-0.038	-0.016	0.09	-0.053	-0.062	0.001	0.089	-0.049	-0.024	0.038	-0.002
黄色铺道蚁 <i>Tetramorium flatum</i>	-0.023	-0.054	-0.044	0.065	-0.037	-0.004	-0.001	0.127*	-0.016	-0.025	-0.029	0.028
中华小家蚁 <i>Monomorium chinense</i>	-0.038	-0.049	-0.072	-0.017	0.002	-0.045	-0.034	0.02	-0.002	-0.028	0.024	0.007
掘穴蚁 <i>Formica cunicularia</i>	-0.147*	-0.127*	-0.189**	0.088	-0.086	-0.057	-0.031	0.115	-0.073	-0.178**	-0.176**	0.186**
红林蚁 <i>Formica sinae</i>	-0.028	-0.034	-0.054	-0.064	0.057	0.064	-0.011	0.028	-0.03	-0.081	-0.037	0.065
艾箭蚁 <i>Cataglyphis aenescens</i>	0.019	0.006	0.073	0.072	0.028	-0.022	0.09	0.076	-0.046	0.068	0.120*	-0.095
中华光胸臭蚁 <i>Lionetopus sinense</i>	-0.028	-0.033	-0.052	-0.066	0.058	0.064	-0.008	0.028	-0.03	-0.081	-0.037	0.066
蚂蚁类群数 Ant Groups richness	0.127*	0.145*	0.262**	-0.114	0.292**	0.112	0.439**	0.135*	0.116	0.245**	0.279**	-0.273**

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

土壤酸碱度是土壤基本属性的重要指标之一,土壤 pH 较高或较低对植物生长均有不利影响。已有的研究表明蚁丘内土壤 pH 会显著低于蚁巢^[14,39-41]。而本研究结果表明,在 5 a 固沙植被区蚁丘内土壤 pH 显著低于蚁丘外,但 8 a 和 57 a 固沙植被区中蚁丘内土壤 pH 均显著高于蚁丘外土壤 pH。这可能是由于蚂蚁群落发生变化,5 a 固沙植被区蚂蚁群落主要由掘穴蚁组成,掘穴蚁通过分解环境中的有机物产生有机酸使得土壤 pH 值降低^[42],而在 8 a 和 57 a 固沙植被区蚂蚁类群数和种类较之前更加丰富,且土壤碳氮含量得到提高,黄色铺道蚁通过分解土壤有机质使土壤盐基离子得到释放^[43],导致蚁丘内土壤 pH 值升高,表 4 也可以证明这一点。这说明不同的蚂蚁群落组成及蚂蚁类群数的变化对于土壤 pH 起调节作用。

本研究表明,土壤砂粒随着固沙年份增加而逐渐降低;土壤粉粒随着固沙年份增加而升高;土壤黏粒在短时间固沙内变化不明显,在经过长期固沙后呈现跳跃式而非渐变式的升高。这说明随着固沙年限的增长,植被生长恢复程度上升,减少了风蚀对固沙林土壤的影响,使土壤逐渐从砂土演变为砂质壤土^[44]。相同固沙年份内土壤粒径组成表现为,57 a 固沙植被区蚁丘内土壤黏粒显著高于蚁丘外,蚁丘内土壤粉粒显著低于蚁丘外,其他固沙年份蚁丘内外土壤粒径组成无明显差异。相关性分析表明,掘穴蚁数量与土壤黏粒、粉粒呈显著负相关,而蚂蚁类群数与土壤黏粒、粉粒呈显著正相关。在 5 a 固沙植被区,蚂蚁群落主要由掘穴蚁构成,掘穴蚁掘沙行为可能加剧风蚀作用,从而减小土壤中的粉粒和黏粒。蚂蚁群落组成中针毛收获蚁、黄色铺道蚁小家蚁和艾箭蚁的活动有利于土壤黏粒、粉粒聚集,在经过长期固沙后,蚂蚁类群数增多,蚂蚁群落中优势种从只有掘穴蚁一种逐渐演变为针毛收获蚁、黄色铺道蚁和掘穴蚁,更丰富的蚂蚁群落对土壤由重砂土向砂壤土转变起推动作用。

土壤有机碳、全氮、全磷、全钾、有效磷和速效钾是衡量固沙植被区土壤恢复情况的重要指标。本研究表明,8 a 固沙植被区蚁丘内土壤有机碳显著高于蚁丘外,在 8 a 及 34 a 固沙植被区土壤全氮也表现出蚁丘内显著高于蚁丘外,土壤全磷所有固沙年份均表现为蚁丘内高于蚁丘外但差异均不显著,57 a 固沙植被区蚁丘内外土壤全钾差异显著,表现为蚁丘内显著高于蚁丘外。这可能是由于蚂蚁通过在蚁巢内积累了大量的枯落物、食物残渣和排泄物,使得巢内土壤有物质富集,进而使得土壤有机质、氮、磷、钾含量的上升^[13]。这说明,在荒漠生态系统中蚁丘对于土壤肥力有聚集作用。

在腾格里沙漠人工固沙林,当流动沙地开始固沙后,土壤理化性质明显变化,这与蚂蚁群落组成及数量特征的变化密切相关。相关性分析表明,黄色铺道蚁个体数与土壤 pH 关系密切;掘穴蚁与土壤有机碳、全氮、全磷及土壤粒径组成关系密切;艾箭蚁与土壤粉粒关系密切;蚂蚁类群数与土壤有机碳、全氮、全磷、有效磷、pH、电导率、土壤粒径的相关性较大。说明土壤理化性质与蚂蚁群落组成及不同种蚂蚁数量特征间关系密切,即在人工固沙林生态系统中,土壤理化性质会受到蚂蚁群落变化的影响^[41]。RDA 分析结果表明,蚂蚁类群数是影响土壤理化性质的主要因素。这说明越丰富的蚂蚁类群对土壤理化性质的影响越大。

本研究结果表明,蚂蚁群落组成对土壤理化性质的总贡献率为 15.4%,这说明在人工固沙林生态系统中,除了蚂蚁群落组成外还有其他因子对固沙区土壤理化性质产生影响,如降水^[44]、风蚀^[45]以及植被地上地下枯落物分解^[46]等。有研究表明,降水是干旱风沙区土壤水分来源的主要途径之一,固沙区土壤水含量在年内的分布变化是由于同时受到气候变化与植被共同作用所导致^[44]。由于固沙区植被盖度低且土壤粒径主要由砂粒组成,风蚀现象对土壤理化性质影响显著,随着固沙年限增加,土壤结皮的形成及植被覆盖度的提高会减小风蚀对固沙区土壤理化的影响^[46-49]。同时固沙区地上地下植被枯落物分解也会改变土壤理化性质。

5 结论

(1) 腾格里沙漠人工固沙植被区蚂蚁群落中掘穴蚁个体数最多,且在不同年限固沙植被区均有分布,属于本研究区的优势类群。随着固沙时间延长,蚂蚁密度呈先增加后减小的趋势,蚂蚁类群数呈现出先上升再趋于不变的趋势。

(2) 土壤含水量、土壤电导率、土壤粉粒和黏粒、土壤全钾表现为仅在 57 a 固沙植被区蚁丘与非蚁丘间存

在显著差异,具体为:土壤含水量和土壤黏粒、土壤全钾表现为蚁丘显著高于非蚁丘,而土壤电导率和土壤粉粒表现为蚁丘显著低于非蚁丘。土壤 pH 表现为仅在 8 a 和 57 a 固沙植被区蚁丘显著高于非蚁丘,土壤有机碳表现为仅在 8 a 固沙植被区蚁丘显著高于非蚁丘,土壤全氮表现为仅在 8 a 和 34 a 固沙植被区蚁丘显著高于非蚁丘。

(3) 固沙植被区中,土壤电导率受蚂蚁个体数、类群数、小家蚁、掘穴蚁和中华光胸臭蚁的影响较为显著;土壤粒径组成受蚂蚁个体数、类群数、小家蚁和掘穴蚁的影响较为显著;土壤有机碳和土壤全氮受蚂蚁个体数、类群数和掘穴蚁的影响较为显著;土壤全磷和有效磷主要受蚂蚁类群数的影响。并且蚂蚁类群数、掘穴蚁和中华光胸臭蚁个体数是影响固沙植被区土壤理化性质的主要限制因子,他们累积解释了土壤理化性质变化的 12.7%。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] 赵士洞, 赖鹏飞, 商界环保协会(香港)译. 千年生态系统评估报告集-二. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
- [3] 王让会. 生态工程的生态效应研究. 北京: 科学出版社, 2014.
- [4] 李新荣, 肖洪浪, 刘立超, 张景光, 王新平. 腾格里沙漠沙坡头地区固沙植被对生物多样性恢复的长期影响. *中国沙漠*, 2005, 25(2): 173-181.
- [5] Houserou H L. 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.
- [6] 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.
- [7] 常海涛, 刘任涛, 刘佳楠, 赵娟, 罗雅曦, 张静, 马继. 草方格造林固沙过程中土壤性质变化及分形特征——以腾格里沙漠东南缘为例. *水土保持学报*, 2018, 32(6): 58-65, 165.
- [8] Yamawo A, Suzuki N, Tagawa J. 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] 刘任涛, 赵哈林, 赵学勇. 沙地生态系统中蚂蚁活动与地表植被及土壤环境间的互作关系. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(12): 166-170.
- [10] 沈梦伟, 陈圣宾, 毕孟杰, 陈文德, 周可新. 中国蚂蚁丰富度地理分布格局及其与环境因子的关系. *生态学报*, 2016, 36(23): 7732-7739.
- [11] 吴坚, 王常禄. 中国蚂蚁. 北京: 中国林业出版社, 1995.
- [12] Jílková V, Šebek O, Frouz J. Mechanisms of pH change in wood ant (*Formica polyctena*) nests. *Pedobiologia*, 2012, 55(5): 247-251.
- [13] 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.
- [14] Paris C I, Gonzalez P M, Garbagnoli C, Martínez P, Somma de Ferré G, Folgarait P J. Litter decomposition and soil organisms within and outside of *Camponotus punctulatus* nests in sown pasture in Northeastern Argentina. *Applied Soil Ecology*, 2008, 40(2): 271-282.
- [15] Verchot L V, Moutinho P R, Davidson E A. Leaf-cutting ant (*Atta Sexdens*) and nutrient cycling: deep soil inorganic nitrogen stocks, mineralization, and nitrification in Eastern Amazonia. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(9): 1219-1222.
- [16] Brown G, Scherber C, Jr R, Ebrahim E. 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.
- [17] 车昭碧, 徐鹏飞, 郭亚亚, 曹佳敏, 黄星宇, 杨寒珺, 鲁为华, 姜莉. 不同草地类型的北方蚂蚁巢及周围土壤理化性质特征分析. *草地学报*, 2021, 29(5): 982-990.
- [18] Wagner D, Jones J B. The impact of harvester ants on decomposition, N mineralization, litter quality, and the availability of N to plants in the Mojave Desert. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(9): 2593-2601.
- [19] 左倩倩, 王邵军, 王平, 曹乾斌, 赵爽, 杨波. 蚂蚁筑巢对西双版纳热带森林土壤有机氮矿化的影响. *生态学报*, 2021, 41(18): 7339-7347.
- [20] 李少辉, 王邵军, 张哲, 陈闽昆, 曹润, 曹乾斌, 左倩倩, 王平. 蚂蚁筑巢对西双版纳热带森林土壤易氧化有机碳时空动态的影响. *应用生态学报*, 2019, 30(2): 413-419.
- [21] 张哲, 王邵军, 陈闽昆, 曹润, 李少辉. 蚂蚁筑巢对不同恢复阶段热带森林土壤易氧化有机碳时空动态的影响. *生物多样性*, 2019, 27(6): 658-666.

- [22] 张雪慧, 张仲胜, 武海涛. 蚂蚁扰动对土壤有机碳循环过程的影响研究进展. 应用生态学报, 2020, 31(12): 4301-4311.
- [23] Cammeraat E L H, Risch A C. The impact of ants on mineral soil properties and processes at different spatial scales. Journal of Applied Entomology, 2008, 132(4): 285-294.
- [24] Ohashi M, Kilpeläinen J, Finér L, Risch A C, Domisch T, Neuvonen S, Niemelä P. The effect of red wood ant (*Formica rufa* group) mounds on root biomass, density, and nutrient concentrations in boreal managed forests. Journal of Forest Research, 2007, 12(2): 113-119.
- [25] Hamburg H V, Andersen A N, Meyer W J, Robertson H G. Ant community development on rehabilitated ash dams in the South African highveld. Restoration Ecology, 2004, 12(4): 552-558.
- [26] 王博, 段玉玺, 王伟峰, 李晓晶, 刘源, 刘宗奇. 人工固沙区植被演替过程中土壤水分时空分异特征. 干旱区研究, 2020, 37(4): 881-889.
- [27] 李新荣, 马风云, 龙立群, 贾晓红. 沙坡头地区固沙植被土壤水分动态研究. 中国沙漠, 2001, 21(3): 217-222.
- [28] 周善义, 陈志林. 中国习见蚂蚁生态图鉴. 郑州: 河南科学技术出版社, 2020.
- [29] 辛明. 中国西北地区蚁科分类研究(膜翅目)[D]. 银川: 宁夏大学, 2015.
- [30] 辛明, 马永林, 贺达汉. 宁夏蚁科昆虫区系研究. 宁夏大学学报: 自然科学版, 2011, 32(4): 403-407, 412.
- [31] 赵晨光, 李慧瑛, 鱼腾飞, 陈薇宇, 谢宗才, 张斌武, 张军. 腾格里沙漠东北缘人工植被对土壤物理性质的影响. 干旱区研究, 2022, 39(4): 1112-1121.
- [32] 陈海燕, 刘新民, 孙卫国, 孙维. 大型土壤动物在沙漠生态系统物质循环中的作用研究. 中国沙漠, 2002, 22(6): 576-580.
- [33] 郭东艳, 窦彩虹, 陈应武, 魏列新, 张新虎. 沙坡头固沙植被区掘穴蚁的巢位选择. 甘肃农业大学学报, 2007, 42(6): 116-119.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 曾飞越, 刘任涛, 吉雪茹, 白燕娇, 杨敏. 沙丘微地形生境蚁丘分布特征及其对恢复过程的响应. 生态学报, 2022, 42(18): 7507-7516.
- [37] 杨晓玉, 邵天杰, 赵景波. 腾格里沙漠沙坡头地区旱季沙层含水量. 水土保持通报, 2016, 36(2): 88-92.
- [38] 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.
- [39] 周立峰, 杨荣, 赵文智. 荒漠人工固沙植被区土壤结皮斥水性发展特征. 中国沙漠, 2020, 40(3): 185-192.
- [40] Wagner D, Jones J B, Gordon D M. Development of harvester ant colonies alters soil chemistry. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36(5): 797-804.
- [41] 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.
- [42] 陈静, 陈金洁, 杨情楠, Cevin Tibihenda, 李祥东, 张晓龙, 王超, 张池, 刘科学. 蚯蚓生态类型和密度对水浇地土壤综合质量的影响. 南方农业学报, 2022, 53(7): 1899-1907.
- [43] 中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组中国土壤系统分类课题研究协作组. 中国土壤系统分类: (修订方案). 北京: 中国农业科技出版社, 1995.
- [44] 田青, 王建兵, 张德罡, 王理德. 腾格里沙漠南缘植被恢复过程中土壤理化性状的变化. 中国沙漠, 2013, 33(3): 772-776.
- [45] 余沛东, 陈银萍, 李玉强, 闫志强, 王旭洋, 牛亚毅, 龚相文. 植被盖度对沙丘风沙流结构及风蚀量的影响. 中国沙漠, 2019, 39(5): 29-36.
- [46] Konečná M, Blažek P, Fibich P, Lisner A, Pech P, Lepš J. Anthills as habitat islands in a sea of temperate pasture. Biodiversity and Conservation, 2021, 30(4): 1081-1099.
- [47] 刘任涛, 赵哈林, 赵学勇, 张铜会, 云建英, 曲浩. 科尔沁沙地流动沙丘掘穴蚁(*Formica cunicularia*)筑丘活动及其对土壤的作用. 中国沙漠, 2010, 30(1): 135-139.
- [48] 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.
- [49] 闫德仁, 姚洪林, 胡小龙. 流动沙丘不同部位风蚀积沙特征研究. 水土保持通报, 2015, 35(4): 288-292.