DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.06.039 CSTR:32311.14.rswc.2026.06.039
赵璇, 刘任涛, 方进, 等. 覆沙和灌丛建植对干旱盐碱地土壤动物多样性分布的影响[J]. 水土保持研究,2026,33(6):284-293.
Zhao Xuan, Liu Rentao, Fang Jin, et al. Effects of sand covering and shrub establishment on soil fauna diversity in arid saline-alkaline soils[J]. Research of Soil and Water Conservation,2026,33(6):284-293.

覆沙和灌丛建植对干旱盐碱地土壤动物多样性分布的影响

赵 璇[1], 刘任涛[1], 方 进[1], 周 磊[1], 杨 敏[1], 赵文智[2]
(1.宁夏大学 生态环境学院/西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地/西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021; 2.中国科学院 西北生态环境资源研究院, 兰州 730000)

摘 要:[目的]覆沙可通过改善土壤理化性质和根部微生境影响中小型土壤动物群落,探究不同覆沙深度与灌丛建植下土壤动物多样性分布规律及其环境驱动因子,旨在为干旱盐碱土改良与生物多样性保护提供科学依据。[方法]在腾格里沙漠东南缘干旱盐碱地,设置3个覆沙深度处理(20 cm,30 cm,40 cm),分别进行多枝柽柳(*Tamarix ramosissima*)和柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)幼苗建植,研究覆沙与灌丛建植条件下中小型土壤动物群落组成与多样性分布特征的动态变化,分析其与土壤环境因子的关系。[结果](1)柠条锦鸡儿生境中,生长2个月时土壤动物常见类群个体数随覆沙深度增加而显著增加;随生长时间延长,覆沙深度对多枝柽柳生境稀有和优势类群个体数存在显著影响,而对柠条锦鸡儿生境的影响较弱。(2)多枝柽柳生境中,中小型土壤动物群落多样性主要受生长时间影响,覆沙深度作用较小;柠条锦鸡儿生境中,生长2个月时群落多样性随着覆沙深度显著增加,而生长13个月时不同覆沙深度间无显著差异。(3)冗余分析结果表明:覆沙和灌丛建植引起的土壤有效磷变化是影响中小型土壤动物群落多样性分布的重要环境因子。[结论]覆沙与灌丛建植通过改变土壤有效磷等生境条件,驱动中小型土壤动物群落结构优化,但不同灌丛下群落响应存在时间差异,多枝柽柳生境中小型土壤动物群落多样性以生长时间为主效应,柠条锦鸡儿生境中则仅在早期对覆沙深度敏感。建议在实践中针对不同灌丛类型确定适宜的覆沙深度,以协同土壤动物多样性的快速恢复与维持。

关键词:盐碱地; 覆沙; 灌丛; 中小型土壤动物; 干旱荒漠区; 生物多样性
中图分类号:S154.5; Q958.11 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-3409(2026)06-0284-10

Effects of sand covering and shrub establishment on soil fauna diversity in arid saline-alkaline soils

Zhao Xuan[1], Liu Rentao[1], Fang Jin[1], Zhou Lei[1], Yang Min[1], Zhao Wenzhi[2]
(1.*School of Ecology and Environment, Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwestern China, Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystems in Northwestern China, Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan* 750021, *China*; 2.*Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou* 730000, *China*)

Abstract: [**Objective**] Sand covering can influence meso-micro soil fauna communities by improving soil physicochemical properties and root microhabitats. This study investigates the distribution patterns of soil fauna diversity and their environmental drivers under different sand-covering depths and shrub establishment, aiming to provide a scientific basis for the improvement of arid saline-alkali soils and biodiversity conservation. [**Methods**] In

收稿日期:2025-09-22 **修回日期:**2026-01-26 **接受日期:**2026-02-07
资助项目:宁夏自然科学基金项目(2026AAC020018;2023AAC01002);宁夏重点研发计划项目(2021BEG03007);国家自然科学基金项目(32360318;U25A20765);宁夏科技创新团队项目(2021RXTDLX01)
第一作者:赵璇(2000—),女,河北石家庄人,硕士研究生,研究方向为生态系统生态学和土壤动物生态学。E-mail:xuanzhao0712@163.com
通信作者:刘任涛(1980—),男,河南南阳人,研究员,博士研究生导师,主要从事生态系统生态学和土壤动物生态学研究。E-mail:liu_rt@nxu.edu.cn

the arid saline-alkaline land on the southeastern edge of the Tengger Desert, three sand-covering depth treatments (20 cm, 30 cm, and 40 cm) were established, and seedlings of *Tamarix ramosissima* and *Caragana korshinskii* were planted to investigate the temporal dynamics of community composition and diversity of meso-micro soil fauna under sand covering and shrub establishment, and to analyze their relationships with soil environmental factors. [**Results**] (1) Two months after planting *C. korshinskii*, the abundance of common soil fauna groups significantly increased with greater sand-covering depth. In later stages, sand-covering depth significantly affected the abundance of rare and dominant groups in *T. ramosissima* habitats but had weaker effects in *C. korshinskii* habitats. (2) In *T. ramosissima* habitats, the diversity of meso-micro soil fauna was mainly affected by growth time, while the effect of sand-covering depth was limited. In *C. korshinskii* habitats, diversity significantly increased with sand-covering depth at 2 months after planting, but no significant differences were observed among different sand-covering depths at 13 months. (3) RDA results indicated that changes in soil available phosphorus induced by sand-covering and shrub establishment were important environmental factors affecting the distribution of meso-micro soil fauna diversity. [**Conclusion**] Sand covering and shrub establishment drive the optimization of meso-micro soil fauna community structure by altering habitat conditions such as soil available phosphorus. However, there are temporal differences in community responses under different shrubs. In *T. ramosissima* habitats, the diversity of meso-micro soil fauna is primarily affected by growth time, while in *C. korshinski*i habitats, it is sensitive to sand-covering depth only at the early stage. It is recommended that suitable sand-covering depths be determined for different shrub types in practice to facilitate the rapid restoration and maintenance of soil fauna diversity.

Keywords: saline-alkali soil; sand covering; shrub; meso-micro soil fauna; arid desert region; biodiversity

覆沙是一种有效抑制盐碱、改善土壤环境的物理措施[1]。已有多项研究表明,覆沙能够显著降低盐碱地土壤含盐量和土壤pH,增加土壤有机碳、有效磷和碱解氮含量[2-3]。同时,覆沙亦可改变盐碱土土壤结构[3],进一步引起植物根系变化[4]。因此,覆沙措施可能对地下土壤生物的栖息环境产生深刻影响,进而影响土壤生物群落组成、多样性分布[5]。而土壤动物是土壤生物的重要组成部分,种类丰富且分布广泛,在植物残体分解、土壤养分循环和调节土壤肥力等过程中发挥着重要作用[6],对环境变化极为敏感。因此,从土壤动物多样性角度探讨覆沙改良干旱盐碱土的生态效应,对于优化干旱区盐碱土壤改良措施,促进退化土地恢复及土壤生物多样性维持均具有重要意义。

目前,关于盐碱生境土壤动物群落特征及其影响因素的研究已有一定积累。研究表明,随着土壤碱化程度的加剧,大型土壤动物个体数逐渐减少,土壤有机质和土壤pH是重要驱动因子[7]。在宁夏银北盐碱地生境中,随土壤pH、碱化度和全盐质量分数降低,土壤动物数量增加[8]。此外,不同盐碱改良措施对土壤动物数量聚集程度的影响不同[9],其中土壤pH、碱化度和全盐含量对土壤动物的影响最大。基于土地利用覆盖变化的研究也表明,盐碱地中小型土壤动物群落多样性指数和个体数低于防护林、耕地、草地等其他6种生境[10]。综合来看,盐碱导致的土壤退化程度以及改良措施均对土壤动物多样性分布产生深刻影响。但是,针对覆沙改良盐碱土壤条件下土壤动物群落响应特征的研究较少。

在干旱盐碱地生态恢复过程中,耐盐碱植物建植通常作为与覆沙等工程措施相配套的重要生物恢复手段。已有研究表明,种植耐盐碱植物可以改变盐碱地的土壤性质,促进土壤养分积累[11],进而影响土壤动物多样性分布。由于不同植物生态生理学特性和功能特征不同,其在覆沙改良背景下,可能对土壤动物栖息环境和土壤动物多样性分布产生不同的影响[10]。如非豆科典型盐生植物多枝柽柳(*Tamarix ramosissima*)能够适应干旱盐碱土壤生境,在其根际区域能够形成适宜土壤动物生存的微环境[12],从而影响土壤动物分布。豆科灌丛柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)是干旱荒漠区常见固沙植物,对盐碱环境有较强耐受力,且豆科植物具有固氮菌能够改良土壤氮含量水平[13],是盐碱土壤改良的重要建植物种。研究表明,种植锦鸡儿1 a能够显著降低盐碱地土壤全盐含量和土壤pH[14],进而可能影响土壤动物生存环境和群落分布[7-8]。但是,在覆沙改良盐碱土壤条件下,不同灌丛建植对中小型土壤动物多样性的影响规律,尚未可知。

鉴于此,本研究以干旱区盐碱地为研究样地,以

覆沙为主要研究因子设置3个覆沙深度处理(20 cm,30 cm,40 cm),在不同灌丛建植背景下(柠条锦鸡儿和多枝柽柳),调查不同覆沙深度灌丛幼苗根部微生境中小型土壤动物多样性分布特征,结合环境因子测定,旨在阐明覆沙和灌丛植被建植对中小型土壤动物群落结构的影响规律,为干旱盐碱地土壤改良、生物多样性保护、人工植被建设及土壤资源合理利用提供依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

本研究样地选择宁夏回族自治区沙坡头国家级自然保护区小湖管理区北侧(37°35′30"N,105°07′35"E,海拔1 252 m左右)。该区域属于温带干旱气候区,属温带大陆性气候[15]。年平均气温9.6 ℃。年平均降水量186.6 mm,年蒸发量3 000 mm,是年平均降水量的16倍[16]。地带性土壤类型为灰钙土。根据《土地利用现状分类》(GB/T21010—2017)[17],研究样地土壤表层盐碱聚集,生长天然耐盐植物芦苇(*Phragmites australis*),为单优势植物分布。

于2022年5月样地布设前,调查土壤本底值为土壤pH值为9.3,从土壤特征上判断属于中度盐碱地。土壤电导率为940.8 μS/cm,含水量为20.64%,有机质含量为7.68 g/kg,碱解氮含量为22.40 mg/kg,速效磷含量为4.57 mg/kg,速效钾含量为1 127.41 mg/kg。覆沙层所用沙土的土壤理化性质为pH值为8.1,电导率为62.3 μS/cm,含水量为1.15%,有机质含量为0.73 g/kg,碱解氮含量为11.32 mg/kg,速效磷含量为3.90 mg/kg,速效钾含量为227.12 mg/kg。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 (1)样地设置。于2022年5月,选择小湖管理区北侧2块盐碱地为研究样地,开展覆沙深度处理和柠条锦鸡儿(*C. korshinskii*)、多枝柽柳(*T. ramosissima*)2种灌丛幼苗种植,每块样地面积200 m×18 m,两块样地用垄土间隔(垄规格:宽30 cm、高30 cm;本试验设计所有垄规格相同)。将每块样地划分为8重复×3覆沙深度=24个试验小区,每个小区面积20 m×5 m,用垄土(规格同上)隔断。

(2)开沟处理。设置开沟覆沙处理3个,包括0—20,0—30,0—40 cm土层深度。即在每个试验小区中间开沟1条,规格:宽度30 cm,深度:20或30或40 cm,长度:20 m,根据开沟深度分别记为D_{20},D_{30},D_{40}。

(3)灌丛幼苗种植。在(2)相对应的开沟中,种植柠条锦鸡儿和多枝柽柳灌丛一年生幼苗,株距1 m,种植深度为20,30,40 cm,分别对应开沟覆沙深度。

(4)覆沙处理。从附近腾格里沙漠取沙覆盖对应的开沟深度处理,包括在灌丛幼苗种植处覆沙,即D_{20}小区覆沙深度为20 cm,以此类推。

共有试验小区48个,即3覆沙深度×8重复×2种建植灌丛=48小区。

1.2.2 土壤样品采集 土壤样品取样时间2022年5月(记为0个月),8月(生长时间记为2个月)和2023年7月(生长时间记为13个月)。

首先,在灌丛幼苗种植的同时(即0个月),在开沟剖面底部采取土壤样品,D_{20},D_{30},D_{40}覆沙处理,土壤采样位置分别为20—30 cm,30—40 cm,40—50 cm土层,为原状土壤剖面底部取样。采用5点取样法,获得一个混合土样。

其次,分别在生长时间2个月和13个月时,在每个试验小区选取3株存活健壮的灌丛幼苗为调查对象,即每个试验小区选取3个取样点,用小铲采集距离幼苗根部5 cm内的土壤样品并进行混合,采样深度与初始取样保持一致,每个试验小区得到混合土样1个。

共获得土壤样品:3覆沙深度×8重复×2建植灌丛×3次取样=144个。

将采集到的土壤样品用保温箱带回实验室,每个土壤样品分为两部分,一部分用于中小型土壤动物分离,另一部分用于土壤理化性质的测定。

1.2.3 中小型土壤动物分离与鉴定 采用Tullgren干漏斗分离法进行中小型土壤动物的分离。即:称取200 g土壤样品放置于干漏斗分离架容量器中,在光照下进行分离48 h,灯泡25 W。将分离得到的中小型土壤动物样品保存于装有75%酒精的西林瓶中,在显微镜(Nikon E200MV)和体视显微镜(Olympus SZX163)下进行镜检。根据《中国土壤动物检索图鉴》[18]、《幼虫分类学》[19]和《蜱螨学》[20]等参考书,对中小型土壤动物进行鉴定,一般鉴定到属水平,少数鉴定到科。

1.2.4 土壤理化指标测定 将采集到的土壤样品在自然条件下风干,过2 mm土壤筛,除去杂质与植物根等,用于各项土壤理化性质的测定。土壤电导率(μS/cm)采用便携式电导率仪(雷磁DDSJ-308 F)进行测定;土壤pH采用PHS-3 C酸度计进行测定;土壤电导率和土壤pH均采用水土质量比为5∶1的土壤浸出液进行测定。土壤有机质(g/kg)采用重铬酸钾—外加热法进行测定;土壤碱解氮(mg/kg)采用碱解扩散法进行测定;土壤有效磷(mg/kg)采用0.5 mol/L $NaHCO_3$-钼锑抗比色法进行测定;土壤速效钾(mg/kg)采用醋酸铵浸提-火焰光度计法进行测

定。土壤含水量(%)采用烘干称重法测定[21]。

1.2.5　数据处理与统计分析　统计中小型土壤动物个体数和类群数,个体数占总个体数的10%以上为优势类群,1%~10%为常见类群,小于1%为稀有类群。采用Shannon-Wiener指数(H)[16]来表征中小型土壤动物群落多样性,公式为:

$$H=-\sum_{i=1}^{S}P_i\log_2 P_i \quad (1)$$

式中:S为物种数目;P_i为属于种i的个体在全部个体中的比例。

采用双因素方差分析覆沙深度和生长时间对环境因子的影响,采用LSD法进行多重比较。采用R 4.0.3的vegan包计算土壤动物多样性指数。采用Scheirer-Ray-Hare检验分析覆沙深度和生长时间对土壤动物群落指数的影响。采用Kruskal-Wallis检验分析同一建植灌丛生境同一时间下覆沙深度对中小型土壤动物多样性的影响,采用Bonferroni校正法进行多重比较分析。方差膨胀因子分析显示7个环境因子VIF值均小于4,故无剔除。

采用Spearman相关性分析土壤动物群落指数与环境因子的相关性。采用冗余分析(redundancy analysis,RDA)研究土壤动物个体分布与环境因子之间的关系。采用偏RDA分析(partial RDA)和蒙特卡罗置换检验(Monte Carlo permutation test)定量评价每个环境因子对土壤动物群落分布变化的贡献率。

以上均在SPSS Statistics 26,Origin 2021,Canoco 5和R 4.0.3中完成。

2　结果与分析

2.1　环境因子

从表1可以看出,多枝柽柳生境土壤有机质和碱解氮含量受覆沙深度及其与生长时间交互作用的显著影响($p<0.01$或$p<0.05$);土壤有效磷、电导率和含水量仅受生长时间的极显著影响($p<0.01$);土壤速效钾和pH除受生长时间显著影响($p<0.01$或$p<0.05$)外,还分别受覆沙深度、交互作用显著影响($p<0.05$)。

柠条锦鸡儿生境土壤pH受覆沙深度、生长时间及二者交互作用的显著影响($p<0.05$或$p<0.01$)。覆沙深度对土壤有机质含量产生显著影响($p<0.05$),生长时间对土壤碱解氮、有效磷和含水量产生极显著影响($p<0.01$),二者交互作用对土壤速效钾含量产生显著影响($p<0.05$)。

表1　覆沙深度和生长时间对环境因子的影响(p值)

Table 1　Effects of sand coverage depth and establishment time on environmental factors (p-values)

灌丛	指标	土壤有机质	土壤碱解氮	土壤有效磷	土壤速效钾	土壤pH	土壤电导率	土壤含水量
多枝柽柳	覆沙深度	<0.010	<0.010	0.077	0.025	0.958	0.442	0.582
	生长时间	0.300	0.310	<0.010	0.028	<0.010	<0.010	<0.010
	覆沙深度×生长时间	<0.010	0.047	0.678	0.854	0.031	0.474	0.345
柠条锦鸡儿	覆沙深度	0.017	0.638	0.225	0.269	0.030	0.081	0.893
	生长时间	0.139	<0.010	<0.010	0.663	<0.010	0.252	<0.010
	覆沙深度×生长时间	0.245	0.714	0.096	0.034	0.021	0.079	0.713

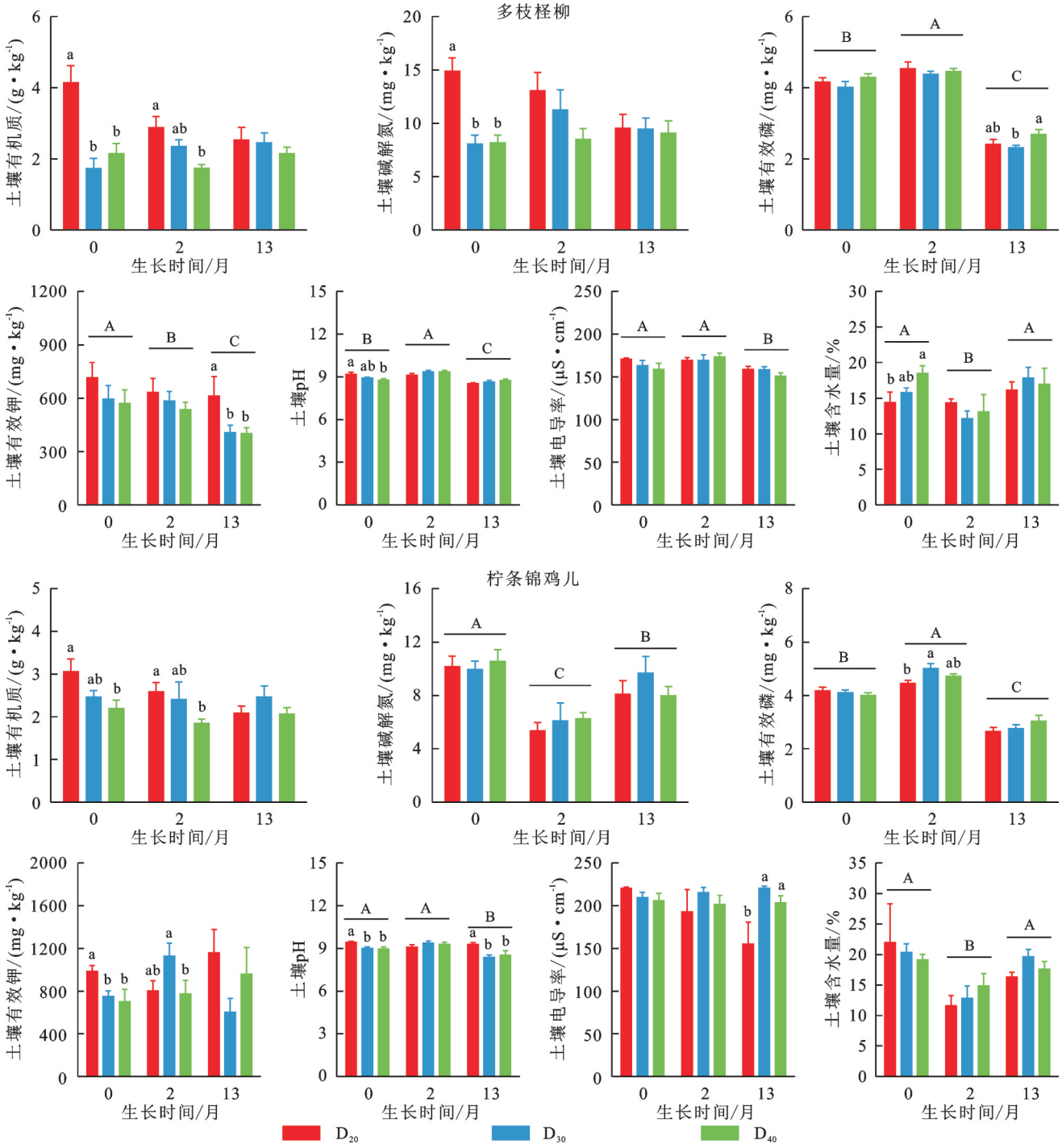
在0~2个月时土壤有机质在不同覆沙深度间差异显著($p<0.05$,图1)。土壤有效磷、含水量和pH在不同生长时间表现出明显差异,其中土壤有效磷在2个月时含量最高,土壤含水量在该时间相对较低,而土壤pH在13个月时最低。多枝柽柳生境中,土壤速效钾和电导率随时间延长显著降低($p<0.05$),且生长13个月时土壤有效磷和速效钾在不同覆沙深度间差异显著($p<0.05$)。柠条锦鸡儿生境中,土壤碱解氮含量在不同生长时间存在显著差异($p<0.05$);生长0~2个月时土壤速效钾在不同覆沙深度间差异显著,而13个月时土壤电导率在不同覆沙深度间差异显著($p<0.05$)。

2.2　中小型土壤动物群落组成

本研究共获得639只中小型土壤动物,隶属于3纲8目58类(科或属),优势类群包括隐爪螨科(Nanorchestidae)和微离螨科(Microdispidae),个体数占比分别为20.97%,14.55%;常见类群包括跗线螨科(Tarsonemidae)、球角蛛属(*Hypogastrura*)、符蛛属(*Folsomia*)等14个类群,个体数占比之和为49.61%;稀有类群包括弓奥甲螨属(*Arcoppia*)、滑缝甲螨属(*Liochthonius*)、原等蛛属(*Proisotoma*)等42个类群,个体数占比之和为14.87%。

其中,多枝柽柳生境中413只,优势类群包括隐爪螨科、微离螨科和跗线螨科,个体数占比分别为19.85%,13.08%和11.38%;常见类群包括球角属、符蛛属、绒螨科(Trombidiidae)等11个类群,个体数占比之和为46.00%;稀有类群包括原等蛛属、隐颚螨属(*Cryptognathus*)、异腾岛螨属(*Heterotene riffia*)等26个类群,个体数占比之和为9.69%。柠条锦鸡儿生境中226只,优势类群包括隐爪螨科和微离螨

科，其个体数占比分别为32.01%和17.26%；常见类群包括库蛛属（*Coloburella*）、苔甲科（Scydmaenidae）、派盾螨科（Parholaspididae）等15个类群，个体数占比之和为44.25%；稀有类群包括新颚螨属（*Neognathus*）、尖奥甲螨属（*Oxyoppia*）、原等蛛属等26个类群，个体数占比之和为15.49%。



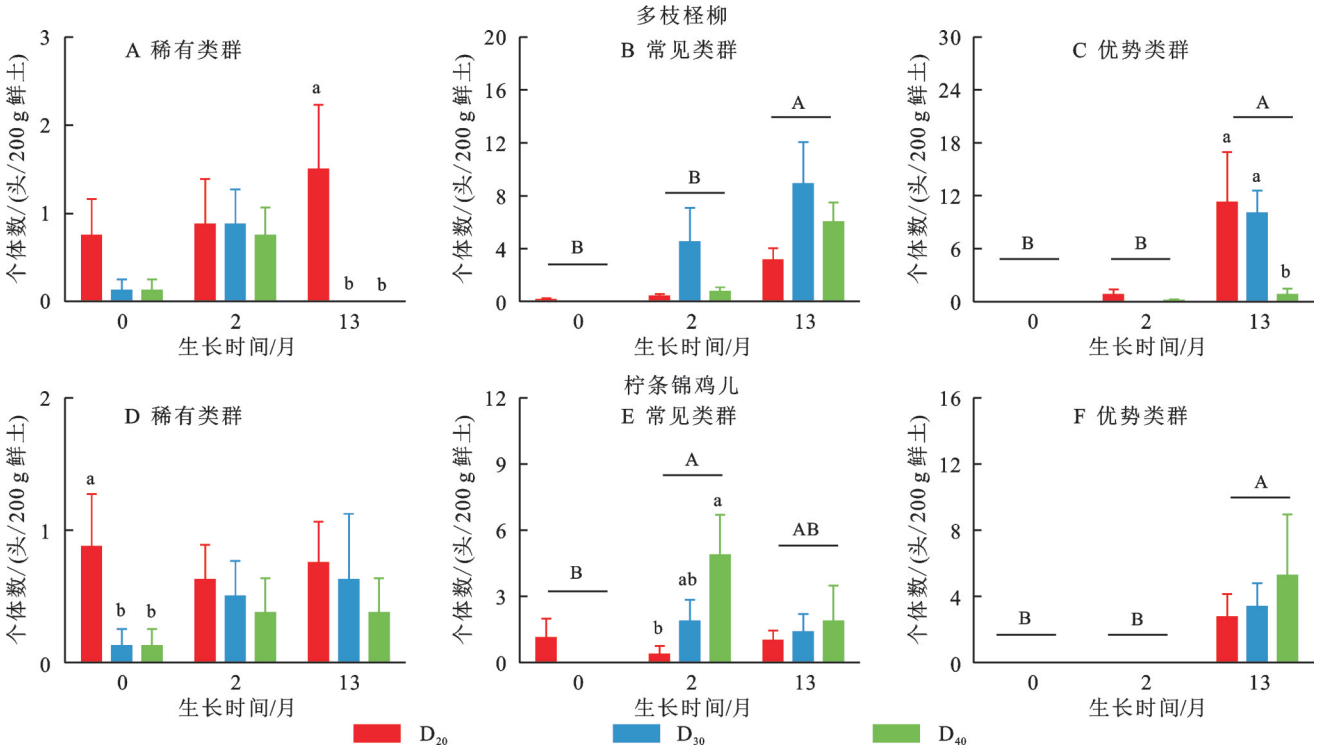
注：不同大写字母表示不同时间存在显著差异（$p<0.05$）；不同小写字母表示同一时间不同覆沙深度存在显著差异（$p<0.05$）。

图1 不同生境环境因子变化

Fig. 1 Variations in environmental factors across different habitats

多枝柽柳生境中，不同覆沙深度对于常见类群个体数无显著影响，但在13个月时显著影响稀有类群和优势类群个体数（$p<0.05$，图2）。

柠条锦鸡儿生境中，不同覆沙深度对各类群个体数影响较小，仅在处理2个月时表现为D_{40}的常见类群个体数显著高于D_{20}（$p<0.05$）。并且，随生长时间延长，多枝柽柳生境常见类群和优势类群个体数以及柠条锦鸡儿生境优势类群个体数显著增加（$p<0.05$），柠条锦鸡儿生境常见类群个体数在处理2个月时达到峰值。



注:不同大写字母表示不同时间存在显著差异($p<0.05$);不同小写字母表示同一时间不同覆沙深度存在显著差异($p<0.05$)。

图 2　不同生境不同类群土壤动物个体数变化

Fig. 2　Variations in abundance of soil fauna taxonomic groups across different habitats

2.3　中小型土壤动物多样性分布

由表 2 可知,在多枝柽柳灌丛微生境中,仅生长时间对中小型土壤动物群落指数存在显著影响($p<0.01$),而覆沙深度及与生长时间的交互作用的影响较小。柠条锦鸡儿灌丛生境中,生长时间及其与覆沙深度相互作用均对中小型土壤动物群落指数产生显著影响($p<0.05$ 或 $p<0.01$),而覆沙深度本身的影响较小。

表 2　覆沙深度和生长时间对土壤动物群落指数的影响(p 值)

Table 2　Effects of sand-covering depth and establishment time on soil fauna community indices (p-values)

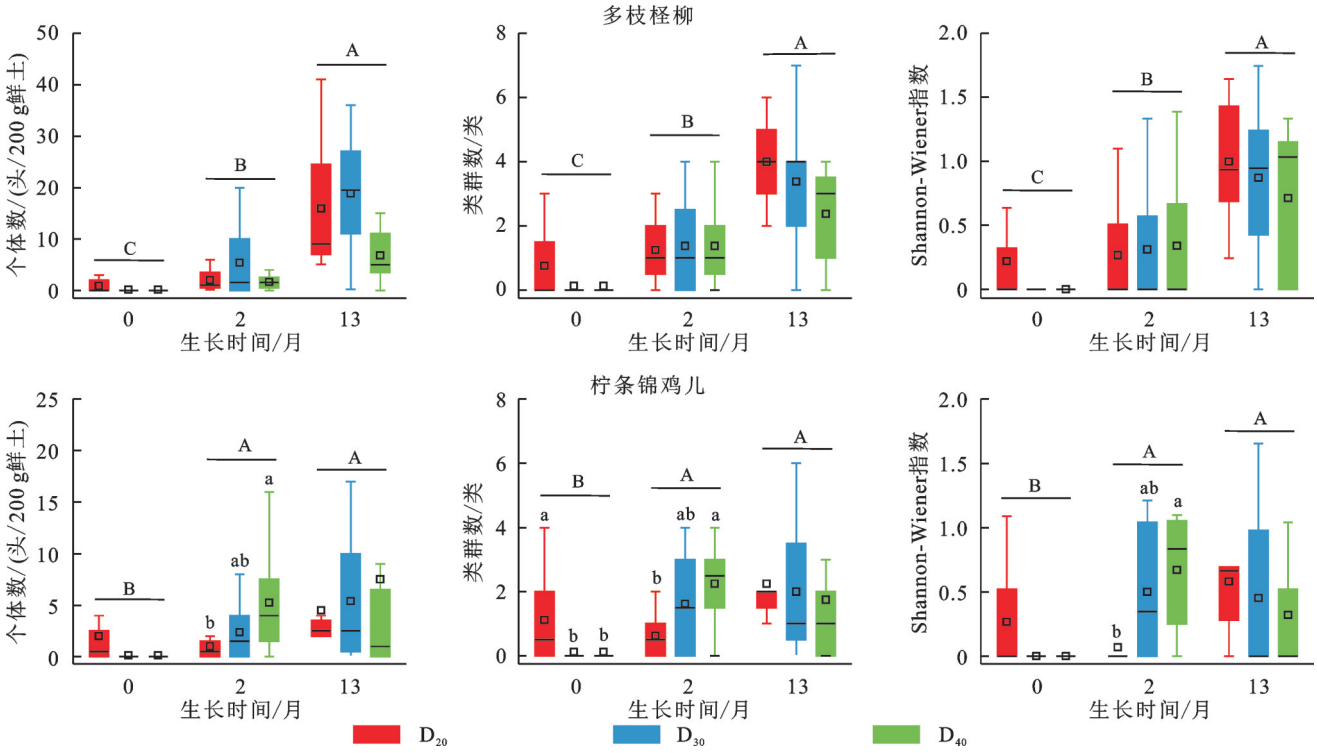
灌丛	指标	覆沙深度	生长时间	覆沙深度×生长时间
多枝柽柳	个体数	0.260	<0.010	0.694
	类群数	0.201	<0.010	0.635
	Shannon-Wiener指数	0.354	<0.010	0.742
柠条锦鸡儿	个体数	0.688	<0.010	0.031
	类群数	0.742	<0.010	0.017
	Shannon-Wiener指数	0.962	<0.010	0.012

多枝柽柳生境中,3 种覆沙深度间中小型土壤动物群落指数均无显著差异,随生长时间延长,中小型土壤动物个体数、类群数和 Shannon-Wiener 指数均表现为显著增加($p<0.05$,图 3)。柠条锦鸡儿生境中 2 个月时,随覆沙深度增加中小型土壤动物多样性显著提高($p<0.05$),但 13 个月时,表现为不同覆沙深度间中小型土壤动物多样性无显著差异。

2.4　中小型土壤动物多样性与环境因子间的相关性

冗余分析结果表明(图 4),多枝柽柳和柠条锦鸡儿灌丛微生境中,第 1 排序轴解释的信息量不显著,但所有排序轴(前者:$F=2.1$,$p=0.038$;后者:$F=1.7$,$p=0.002$)达到显著水平,说明排序分析能够较好地反映中小型土壤动物与环境因子间的相关关系,第 1 排序轴和第 2 排序轴累计方差解释率分别为 16.96% 和 10.81%。土壤有效磷是影响其中小型土壤动物群落分布的主要环境因子($p<0.05$),贡献率分别为 52.5% 和 43.1%。多枝柽柳生境中,中小型土壤动物优势类群个体数仅与土壤有效磷呈显著负相关(表 3,$p<0.01$),除此之外,其他指数与土壤有效磷和 pH 同时呈显著负相关($p<0.05$ 或 $p<0.01$);土壤速效钾与个体数、常见类群个体数呈显著负相关($p<0.05$ 或 $p<0.01$),土壤电导率仅与个体数呈显著负相关($p<0.05$)。柠条锦鸡儿生境中,中小型土壤动物个体数、类群数、Shannon-Wiener 指数和常见类

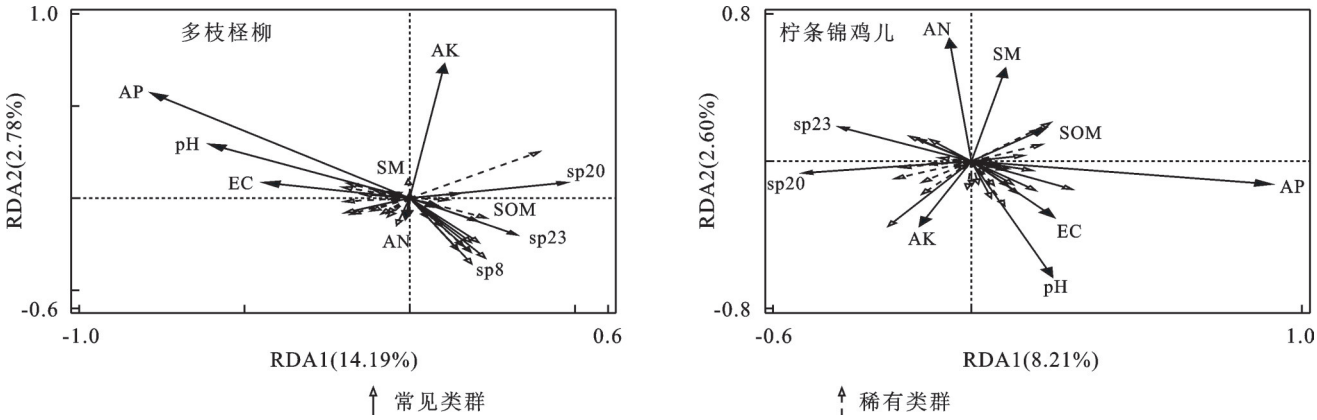
群个体数与土壤含水量呈显著负相关($p<0.05$或$p<0.01$),此外,常见类群个体数还与土壤碱解氮呈显著负相关($p<0.05$);优势类群和稀有类群个体数仅与土壤有效磷呈显著负相关($p<0.05$或$p<0.01$)。



注:不同大写字母表示不同时间存在显著差异($p<0.05$);不同小写字母表示同一时间不同覆沙深度存在显著差异($p<0.05$)。

图3 不同生境土壤动物群落指数变化

Fig. 3 Variations in soil fauna community indices across different habitats



注:SM表示土壤含水量;EC表示土壤电导率;pH表示土壤pH;SOM表示土壤有机质;AP表示土壤有效磷;AK表示土壤速效钾;AN表示土壤碱解氮。sp8表示跗线螨科;sp20表示隐爪螨科;sp23表示微离螨科。

图4 灌丛微生境土壤动物与环境因子关系的RDA排序图

Fig. 4 Soil fauna-environment relationship in shrub microhabitats (RDA ordination)

3 讨 论

3.1 覆沙对中小型土壤动物群落组成的影响

本研究结果表明,覆沙能显著改善干旱盐碱地土壤的理化性质(图1),13个月时土壤pH显著降低,与李娟等[22]覆沙降低土壤pH的结论一致。统计分析结果显示,生长时间对2种灌丛生境中小型土壤动物个体数均产生极显著影响,随时间延长,优势类群和常见类群个体数显著增长,这表明,覆沙与灌丛建植通过持续改善土壤环境,对中小型土壤动物群落结构具有重要调控作用。已有研究指出,土壤理化性质改变会对生存在土壤中的中小型土壤动物群落组成和分布产生影响[23],本研究中,土壤pH和电导率的降低,为更多种类和数量的中小型土壤动物提供了适宜的生存环境[7-8]。此外,土壤环境改善促进微生物活动,为中小型土壤动物提供了更多的食物资源[24]。本研究过程中同步记录了灌丛株高变化,结果显示2种灌丛在覆沙处理下整体呈现生长趋势,表明覆沙为植被生长提供了有利条件。

表 3　灌丛微生境土壤动物群落指数与环境因子的 Spearman 相关性分析

Table 3　Spearman correlations of soil fauna community indices with environmental factors in shrub microhabitats

灌丛	指标	土壤有机质	土壤碱解氮	土壤有效磷	土壤速效钾	土壤pH	土壤电导率	土壤含水量
多枝柽柳	个体数	0.078	0.062	−0.538**	−0.253*	−0.287*	−0.254*	−0.102
	类群数	0.061	0.034	−0.475**	−0.225	−0.279*	−0.188	−0.063
	Shannon-Wiener指数	0.005	−0.092	−0.453**	−0.192	−0.255*	−0.096	0.023
	优势类群	0.143	0.090	−0.544**	−0.117	−0.204	−0.231	−0.081
	常见类群	−0.091	−0.063	−0.364**	−0.336**	−0.252*	−0.148	−0.007
	稀有类群	−0.065	−0.140	−0.315**	0.001	−0.309**	−0.152	−0.111
柠条锦鸡儿	个体数	−0.144	−0.144	−0.129	0.105	0.100	0.060	−0.324**
	类群数	−0.123	−0.155	−0.116	0.077	0.081	0.085	−0.302**
	Shannon-Wiener指数	−0.107	−0.108	−0.050	0.014	0.074	0.128	−0.241*
	优势类群	−0.056	0.168	−0.257*	0.007	0.021	−0.025	−0.211
	常见类群	−0.056	−0.257*	0.103	0.040	0.085	0.198	−0.360**
	稀有类群	−0.021	0.051	−0.331**	−0.042	−0.078	0.001	0.046

注:*表示 $p<0.05$,**表示 $p<0.01$。

中小型土壤动物对土壤速效养分的响应在2种灌丛生境中存在差异。多枝柽柳生境中,2个月时土壤有效磷含量达到峰值,而冗余分析表明土壤有效磷是解释中小型土壤动物群落分布的首要环境因子,这与李克中等[25]研究表明的中小型土壤动物通过促进有机质分解和氮磷矿化,形成“养分—动物”正反馈循环,从而显著刺激隐爪螨科、微离螨科等腐食性类群的繁殖结论一致。柠条锦鸡儿生境中,中小型土壤动物个体数和类群数与土壤速效养分无显著相关性,反而受土壤含水量显著调控。这可能与多枝柽柳与柠条锦鸡儿根系结构、生理生态特性等存在差异密切相关,柠条以浅层水平根系为主[13],其根部微生境对水分变化更为敏感,在D_{20}条件下土壤含水量波动明显,从而导致中小型土壤动物群落结构随生长时间出现明显变化。此外,多枝柽柳生境中土壤电导率与土壤动物个体数呈现负相关,印证了盐分抑制土壤生物活性的结论[8-9];除优势类群个体数外,其他群落指数均与土壤pH呈显著负相关,说明覆沙降低土壤pH,有利于对土壤pH敏感的非优势类群的迁入与定殖[23]。

3.2　覆沙对中小型土壤动物群落多样性的影响

食物资源[24]和土壤养分[26]的多寡会影响中小型土壤动物群落多样性分布。本研究中生长时间显著提升了中小型土壤动物类群数和Shannon-Wiener指数,但在不同灌丛生境和覆沙深度的响应存在差异。多枝柽柳和柠条锦鸡儿生境在13个月时中小型土壤动物类群数量分别提高162.5%和288.9%,表明灌丛生长过程在促进土壤动物多样性方面具有关键作用。尽管土壤有机质含量随生长时间下降,但矿化速率提升导致速效养分阶段性释放,2个月时土壤有效磷含量达到峰值,可以促进中小型土壤动物繁殖[25]。同时,本研究中覆沙显著降低土壤电导率,减轻盐分胁迫,为稀有类群提供定殖条件[27]。

多枝柽柳生境中小型土壤动物类群数和Shannon-Wiener指数在3种覆沙深度下均随生长时间上升,但在D_{30}下增长幅度最大,这可能与D_{30}较高的土壤含水量有关,保障了隐爪螨科等一些湿生类群的栖息需求,同时避免土壤有机质的快速矿化,使得土壤碱解氮在D_{30}深度下缓慢释放,为中小型土壤动物持续地提供生存资源。相关性分析显示中小型土壤动物多样性与土壤有效磷呈显著负相关,D_{30}深度土壤有效磷含量在13个月时最低,可能反映出养分被生物持续利用的过程。

柠条锦鸡儿生境中小型土壤动物多样性随生长时间的变化在不同覆沙深度存在差异,这可能与优势类群或常见类群(隐爪螨科、微离螨科和跗线螨科)对环境因子的敏感性有关,这些类群对群落结构的影响较大[28]。相关性分析表明中小型土壤动物多样性与土壤含水量呈显著负相关,覆沙2个月时显著下降的土壤含水量为土壤动物提供了良好的生存空间。D_{40}中较低的土壤pH有利于柠条锦鸡儿根系生长,进而提高了土壤养分含量,增加了土壤微生物的数量[29],提供了更多食物资源,因此中小型土壤动物群落指数显著提高。

冗余分析结果显示环境因子对2种灌丛生境中小型土壤动物个体分布总贡献率仅为16.96%和10.81%,说明本试验未涉及的其他环境因子,如土壤温度、土壤容重、土壤全氮、土壤全磷等同样对中小

型土壤动物个体数产生影响[30]。此外,本试验需要通过长时间多季节取样,探究开沟覆沙和种植灌丛对干旱区盐碱土壤生境中小型土壤动物多样性分布的长效影响;植物根系分泌物可能调控土壤微生物群落结构,进而影响土壤动物的生存和多样性,这一点需要进一步研究。

4 结 论

覆沙显著改变土壤理化性质,通过降低土壤pH和电导率等、改善根部微生境,为中小型土壤动物的生存和扩散提供了有利基础,进而改变干旱区盐碱土壤生境中小型土壤动物群落结构,常见类群和优势类群数量显著增多,个体数、类群数和Shannon-Wiener指数也显著增加。不同灌丛生境下,中小型土壤动物群落对覆沙的响应存在差异。多枝柽柳灌丛微生境中小型土壤动物群落多样性受生长时间的影响较大,而受覆沙深度的影响较小;柠条锦鸡儿灌丛微生境中其受到生长时间与覆沙深度的双重影响。研究表明,在干旱盐碱地生态恢复过程中,覆沙和植被建设具有协同作用,不同种类灌丛对土壤生物多样性的生态效应不同,需要考虑灌丛种类对植被建设效应的影响。

参考文献(References):

[1] 关红杰,冯浩,吴普特.土壤砂砾覆盖对入渗和蒸发影响研究进展[J].中国农学通报,2008,24(12):289-293.
Guan H J, Feng H, Wu P T. Progress in the research on the impact of gravel mulch on infiltration and evaporation [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24 (12):289-293.

[2] Wang J, Yang C X, Zhang H O, et al. Improving soil properties by sand application in the saline-alkali area of the middle and lower reaches of the Yellow River, China [J]. Sustainability, 2023,15(12):9437.

[3] 尹志荣,柯英,桂林国,等.覆沙对盐碱地土壤水盐运移及枸杞生长和产量的影响[J].西北农业学报,2021,30(9):1382-1393.
Yin Z R, Ke Y, Gui L G, et al. Effects of sand-covered on soil water and salt movement of saline-alkali land and *Lycium barbarum* growth and yield[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2021,30(9):1382-1393.

[4] Teraminami T, Nakashima A, Ominami M, et al. Effects of sand burial depth on the root system of *Salix cheilophila* seedlings in Mu Us Sandy Land, Inner Mongolia, China[J]. Landscape and Ecological Engineering, 2013,9(2):249-257.

[5] 尹文英.土壤动物学研究的回顾与展望[J].生物学通报,2001,36(8):1-3.
Yin W Y. A brief review and prospect on soil zoology[J]. Bulletin of Biology, 2001,36(8):1-3.

[6] Filser J. The role of Collembola in carbon and nitrogen cycling in soil Proceedings of the Xth international Colloquium on Apterygota, České Budějovice 2000: apterygota at the Beginning of the Third Millennium[J]. Pedobiologia, 2002,46(3/4):234-245.

[7] 邱丽丽,刘静,付关强,等.长岭草原不同盐碱地大型土壤动物的多样性[J].贵州农业科学,2014,42(10):234-239.
Qiu L L, Liu J, Fu G Q, et al. Diversity of soil macrofauna in different saline-alkali soils of Changling Grassland[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2014,42(10):234-239.

[8] 贺奇,杨贵军,张文银,等.宁夏银北盐碱地油葵田土壤动物多样性及群落结构[J].应用昆虫学报,2014,51(1):255-263.
He Q, Yang G J, Zhang W Y, et al. Soil animal diversity and community structure of saline-alkali soil in sunflower fields in northern Ningxia[J]. Chinese Journal of Applied Entomology, 2014,51(1):255-263.

[9] 杨贵军,张建英.不同改良措施下盐碱苜蓿地土壤节肢动物群落特征与土壤因子的关系[J].湖北农业科学,2016,55(11):2785-2791.
Yang G J, Zhang J Y. Community structure of soil arthropods and its relationship with soil factors of saline-alkali soil in alfalfa fields under different improvement measures [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2016,55(11):2785-2791.

[10] 毛丽旦·艾泽孜,吾玛尔·阿布力孜,苏来曼·阿布力克木,等.新疆艾比湖流域平原区不同生境中小型土壤动物群落多样性与相似性[J].干旱区资源与环境,2015,29(6):104-109.
Mavluda·Eziz, Omar·Abliz, Sulayman·Ablikim, et al. The diversity and similarity of soil meso-and microfaunal community at different habitats in plain area of Ebinur lake basin, Xinjiang[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015,29(6):104-109.

[11] Jing C L, Xu Z C, Zou P, et al. Coastal halophytes alter properties and microbial community structure of the saline soils in the Yellow River Delta, China[J]. Applied Soil Ecology, 2019,134:1-7.

[12] Gu C, Huang W B, Shao Q, et al. Effects of different growth patterns of *Tamarix chinensis* on saline-alkali soil: Implications for coastal restoration and management [J]. Biotechnology Letters, 2022,44(12):1519-1526.

[13] 陆保福,康文娟,师尚礼,等.豆科植物-根瘤菌固氮系统及其碳氮互作[J].中国草地学报,2023,45(11):119-135,144.
Lu B F, Kang W J, Shi S L, et al. Nitrogen fixation system of legume-rhizobia and its carbon-nitrogen interaction[J]. Chinese Journal of Grassland, 2023,45(11):119-135,144.

[14] 马飞,徐婷婷,李明,等.锦鸡儿植物对盐碱地土壤理化性质和细菌群落的影响[J].西北植物学报,2017,37(9):1872-1880.
Ma F, Xu T T, Li M, et al. Effect of plantation of *Caragana* species on soil properties and bacterial community dynamics in saline-alkali soil[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2017,37(9):1872-1880.

[15] 高操,邢丽珠,张方敏,等.沙坡头国家级自然保护区土地利用格局及生态服务价值变化评估[J].江苏农业科学,2020,48(20):276-282.
Gao C, Xing L Z, Zhang F M, et al. Assessment of land use pattern and ecological service value change in Shapotou National Nature Reserve[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020,48(20):276-282.

[16] 杨敏,刘任涛,曾飞越,等.腾格里沙漠东南缘人工固沙植被演替地面节肢动物群落多样性分布特征[J].生态学报,2024,44(1):428-439.
Yang M, Liu R T, Zeng F Y, et al. Distribution of ground-active arthropod community diversity during the succession of artificial sand-fixing vegetation in the southeastern Tengger Desert [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(1):428-439.

[17] 张凤荣.分区分类因地制宜综合改造利用盐碱地[J].中国土地,2023(8):30-32.
Zhang F R. Zoning, classification, comprehensive transformation and utilization of saline-alkali land according to local conditions[J]. China Land, 2023(8):30-32.

[18] 尹文英.中国土壤动物检索图鉴[M].北京:科学出版社,1998.
Yin W Y. Pictorical Keys to Soil Animals of China[M]. Beijing: Science Press, 1998.

[19] 钟觉民.幼虫分类学[M].北京:农业出版社,1990.
Zhong J M. Larval Taxonomy[M]. Beijing: Agriculture Press, 1990.

[20] 李隆术.蜱螨学[M].重庆:重庆出版社,1988.
Li L S. Acarology [M]. Chongqing: Chongqing Publishing Group, 1988.

[21] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
Bao S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.

[22] 李娟,韩霁昌,张扬,等.盐碱地综合治理的工程模式[J].南水北调与水利科技,2016(3):188-193.
Li J, Han J C, Zhang Y, et al. Model analysis about comprehensive control project of saline-alkali field[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016(3):188-193.

[23] Kardol P, Reynolds W N, Norby R J, et al. Climate change effects on soil microarthropod abundance and community structure[J]. Applied Soil Ecology, 2011, 47(1):37-44.

[24] 邱月,吴鹏飞,魏雪.三种人工草地小型土壤节肢动物群落多样性动态及其差异[J].草业学报,2020,29(5):21-32.
Qiu Y, Wu P F, Wei X. Differences among three artificial grasslands in dynamics and community diversity of soil microarthropods [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020,29(5):21-32.

[25] 李克中,朱永恒.中小型土壤动物组成对复垦铜尾地土壤养分的影响[J].生态学报,2015,35(12):3979-3987.
Li K Z, Zhu Y H. Influence of meso-and micro-fauna composition on soil nutrient dynamics in reclaimed soil in copper tailings[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(12):3979-3987.

[26] 张玉峰,毕艳孟,李国强,等.河北地区不同农田蚯蚓多样性及其与土壤环境的关系[J].中国农业大学学报,2017,22(3):60-68.
Zhang Y F, Bi Y M, Li G Q, et al. Relationship between earthworm diversity and soil environment in Hebei area[J]. Journal of China Agricultural University, 2017,22(3):60-68.

[27] 朱甜甜,海鹭,曹文旭,等.沙化草地恢复中小叶锦鸡儿对植被和土壤的影响[J].干旱区研究,2024,41(11):1875-1886.
Zhu T T, Hai L, Cao W X, et al. Effects of *Caragana microphylla* on vegetation and soil in the restoration of desertified grasslands[J]. Arid Zone Research, 2024,41(11):1875-1886.

[28] 张安宁,常海涛,陈蔚,等.干旱风沙区灌丛林地地面节肢动物群落对放牧管理的响应[J].应用生态学报,2019,30(11):3931-3941.
Zhang A N, Chang H T, Chen W, et al. Responses of ground-active arthropod community in *Caragana* shrub plantations to grazing management in desertified region [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(11):3931-3941.

[29] Wang X G, Sun R B, Tian Y P, et al. Long-term phytoremediation of coastal saline soil reveals plant species-specific patterns of microbial community recruitment[J]. mSystems, 2020,5(2):e00741-e00719.

[30] 杨大星,杨娟,李灿.喀斯特洞穴小型土壤节肢动物多样性[J].生态学报,2022,42(12):5089-5102.
Yang D X, Yang J, Li C. Diversity of cave soil microarthropod in karst region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(12):5089-5102.